



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

INFLUENCIA DEL DESGASTE DE FLANCO EN LA
MODELIZACIÓN NUMÉRICA 2D DEL CORTE ORTOGONAL
DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Autor: María Polo Rojo

Director: Jose Luis Cantero Guisández

Leganés, Julio de 2011.

Título: 'Influencia del desgaste de flanco en la modelización numérica 2D del corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos.'

Autor: María Polo Rojo.

Director: Jose Luis Cantero Guisández.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y a mi hermana, cuyo apoyo incondicional
y cariño me han acompañado siempre a
lo largo de todo este camino.

GRACIAS.

Os quiero H, O y G.

ÍNDICE

A. ÍNDICE DE FIGURAS	iv
B. ÍNDICE DE TABLAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Fases de desarrollo	4
1.4. Medios para la realización del proyecto	4
1.5. Esquema de la memoria	4
2. PROCESOS DE MECANIZADO	7
2.1. Aspectos generales	7
2.2. El proceso de formación de viruta	14
2.2.1. Mecanismos de formación de viruta	14
2.2.2. Tipos de viruta	16
2.2.3. Temperatura	18
2.2.4. Rozamiento	20
2.2.5. Fuerzas y velocidades desarrolladas	23
2.2.6. Tensiones residuales	26

2.3. <u>Herramientas de corte</u>	27
2.3.1. <u>Materiales para las herramientas de corte.</u>	27
2.3.2. <u>Metales duros. Carburo de Wolframio</u>	28
2.3.3. <u>Desgaste de las herramientas</u>	30
2.4. <u>Materiales mecanizables</u>	34
2.4.1. <u>Maquinabilidad</u>	34
2.4.2. <u>Aceros inoxidables</u>	35
3. <u>MODELIZACIÓN NUMÉRICA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS</u>	39
4. <u>MARCO DEL PROYECTO: TRABAJOS PREVIOS</u>	43
4.1. <u>Trabajo experimental</u>	45
4.2. <u>Trabajo de simulación</u>	47
4.3. <u>Validación del modelo numérico previo</u>	49
4.4. <u>Análisis del efecto de varias pasadas</u>	50
5. <u>DESCRIPCIÓN DEL MODELO</u>	52
5.1. <u>Descripción del proceso</u>	55
5.2. <u>Definición de la pieza</u>	57
5.2.1. <u>Geometría</u>	57
5.2.2. <u>Material</u>	57
5.2.3. <u>Mallado</u>	60
5.2.4. <u>Condiciones de contorno</u>	63
5.3. <u>Definición de la herramienta</u>	64

5.3.1. <u>Geometría</u>	64
5.3.2. <u>Material</u>	66
5.3.3. <u>Mallado</u>	66
5.3.4. <u>Condiciones de contorno</u>	68
5.4. <u>Condiciones de fricción</u>	69
5.5. <u>Condiciones de simulación</u>	72
5.6. <u>Definición de la segunda pasada</u>	74
6. <u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>	76
6.1. <u>Geometría de la viruta</u>	77
6.1.1. <u>Espesor</u>	77
6.1.2. <u>Ángulo de cizalladura</u>	79
6.1.3. <u>Longitud de contacto</u>	81
6.2. <u>Fuerzas de mecanizado</u>	83
6.3. <u>Presión normal</u>	94
6.4. <u>Temperatura</u>	101
7. <u>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS</u>	112
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	116

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1: Imagen de un proceso de arranque de viruta.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2: Imagen de una máquina herramienta.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.3: Movimientos y parámetros de corte en un torneado.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.4: Representación esquemática de un corte ortogonal y oblicuo.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.5: Ángulos y superficies características en el corte ortogonal.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.6: Fases de formación de la viruta.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.7: Zonas en el proceso de cizalladura.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.8: Diferentes tipos de viruta.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.9: Distribución típica de temperaturas en la zona de corte.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.10: Reparto de la disipación del calor en función de la velocidad de corte.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.11: Contacto entre dos superficies.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.12: Descomposición de las fuerzas en el modelo de corte ortogonal.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.13: Velocidades en el modelo de corte ortogonal.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.14: Comparación de propiedades de los materiales corte.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.15: Evolución de la dureza frente a la temperatura para distintos materiales de corte.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.16: Diferentes plaquitas de metal duro.....</i>	<i>30</i>

<i>Figura 2.17: Esquema bidimensional de la herramienta sin desgaste y con desgaste de flanco 0.4mm.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.18: Tipos de desgaste de las herramientas de corte.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.19: Composición del acero AISI 316L.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.1: Simulación del comportamiento de una biela a través de elementos finitos.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.2: Esquema del proceso de discretización llevado a cabo en el MEF.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.1: Casos recogidos por la Tesis para su estudio.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.1: Muestra de una modelización numérica de dos pasadas en 3D.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2: Pantalla principal del DEFORM 2D.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.3: Esquema del proceso de reducción del dominio para la aplicación del modelo numérico.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.4: Simplificación bidimensional del modelo.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.5: Medidas de la pieza.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.6: Módulo de Young en función de la temperatura (°C).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.7: Expansión térmica (mm/mm°C) en función de la temperatura (°C).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.8: Conductividad térmica (N/s/°C) en función de la temperatura (°C).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.9: Definición del calor específico (N/mm2/°C): en función de la temperatura (°C).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.10: Ventanas utilizadas para el mallado de la pieza en la primera pasada.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.11: Condiciones de contorno de velocidad aplicadas a la pieza.....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 5.12: Geometrías de la herramienta sin desgaste, y con desgaste de flanco de 0.05, 0.4 y 0.8 mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.13: Mallado de la herramienta sin desgaste y con desgaste de flanco de 0.05, 0.4 y 0.8 mm.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.14: Condiciones de contorno de velocidad aplicadas a la herramienta....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.15: Ventanas de fricción empleadas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.16: Zona de contacto real.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.17: Ventanas de mallado utilizadas en la segunda pasada.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.1: Ejemplo de la medida del espesor sobre la viruta formada.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.2: Espesor de viruta en función del nivel de desgaste.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.3: Ángulo de cizalladura en función del nivel de desgaste.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.4: Esquema de la medida de la longitud de contacto.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 6.5: Longitud de contacto en función del nivel de desgaste.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 6.6: Fuerza de corte, en función del tiempo, para la primera pasada con herramienta sin desgaste.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.7: Fuerza de avance, en función del tiempo, para la primera pasada con herramienta sin desgaste.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.8: Fuerza de corte, en función del tiempo, para la primera pasada con la herramienta con desgaste de flanco de 0.8 mm.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.9: Fuerza de avance, en función del tiempo, e para la primera pasada con la herramienta con desgaste de flanco de 0.8 mm.....</i>	<i>86</i>

<i>Figura 6.10: Fuerza de corte en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.11: Fuerza de avance en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 6.12: Relación F_a/F_c en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 6.13: Fuerza de corte en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 6.14: Fuerza de avance en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 6.15: Relación F_a/F_c en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 6.16: Zonas de contacto consideradas.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 6.17: Distribución de la presión normal en la zona secundaria para la herramienta sin desgaste en la primera pasada.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 6.18: Presión normal en la zona secundaria de corte en función del nivel de desgaste.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 6.19: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta sin desgaste en la primera pasada.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 6.20: Detalle de la distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 en la primera pasada.....</i>	<i>98</i>

<i>Figura 6.21: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm en la primera pasada.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6.22: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm en la primera pasada.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6.23: Evolución de la presión en función de la distancia al filo para flanco 0.4 mm, primera pasada.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 6.24: Evolución de la presión en función de la distancia al filo para flanco 0.8 mm, primera pasada.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 6.25: Distribución de temperaturas para la herramienta con desgaste de flanco 0.04 mm en la 1 pasada.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 6.26: Comparación de la distribución de temperaturas obtenidas en la viruta durante la primera pasada para los cuatro niveles de desgaste.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 6.27: Temperatura máxima en función del nivel de desgaste en la zona secundaria de corte.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 6.28: Comparación de la distribución de temperaturas obtenidas en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada durante la primera pasada para los cuatro niveles de desgaste.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 6.29: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta sin desgaste....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 6.30: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 mm.....</i>	<i>107</i>

<i>Figura 6.31: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 6.32: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6.33: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta sin desgaste....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6.34: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 mm.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6.35: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6.36: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm.....</i>	<i>110</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 5.1: Parámetros de corte</i>	55
<i>Tabla 5.2: Propiedades del Carburo de Wolframio utilizado</i>	66
<i>Tabla 5.3: Media de errores en porcentaje (%) de la fuerza de corte (F_c) con las leyes de contacto estudiadas</i>	71
<i>Tabla 5.4: Media de errores en porcentaje (%) de la fuerza de avance (F_a) con las leyes de contacto estudiadas</i>	71
<i>Tabla 6.1: Espesor de viruta</i>	78
<i>Tabla 6.2: Ángulo de cizalladura</i>	80
<i>Tabla 6.3: Longitud de contacto</i>	82
<i>Tabla 6.4: Fuerzas de corte, avance y ratio obtenidas en la primera y segunda pasada</i>	88
<i>Tabla 6.5: Presión normal en la zona secundaria de corte</i>	96
<i>Tabla 6.6: Temperaturas máximas alcanzadas en la zona de contacto viruta-herramienta</i>	103

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN.

El mecanizado es un proceso de fabricación muy utilizado en la industria. Día a día se realizan numerosos estudios para poder mejorar su eficiencia en su aplicación a los diversos materiales y en las distintas condiciones de corte posibles.

El uso de aceros inoxidable es de gran interés, especialmente para aplicaciones de elevada responsabilidad en la industria aeroespacial, química o nuclear. Por ello el análisis de los procesos que intervienen durante su mecanizado es de gran importancia. Una de las condiciones en las que no se ha profundizado demasiado aún, es el trabajo de los mismos en ausencia de fluido de corte, lo que se conoce como mecanizado en seco. Éste se hace cada día más interesante por razones medioambientales principalmente, aunque su utilización acentúa los factores que afectan al desgaste de las herramientas y a la integridad superficial de la pieza.

Por todas estas razones surgió la necesidad de realizar un estudio termomecánico del efecto del desgaste geométrico de las herramientas en el torneado en seco de aceros inoxidable austeníticos, que se recoge en la Tesis de la profesora Nacarí Marín [\[1\]](#) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. En esta Tesis se analizan numerosos tipos de desgaste en unas determinadas condiciones de corte y combina el análisis experimental con el análisis numérico a través de la definición de un modelo en elementos finitos.

Debido a la especial importancia de uno de los tipos de desgaste analizados, el desgaste por flanco, se ha decidido extender y completar su estudio en este proyecto.

La relevancia del desgaste de flanco es debida a dos factores: su elevada frecuencia en los procesos de mecanizado y las consecuencias que tiene sobre el acabado y las dimensiones finales de la pieza.

La profundización en la influencia que el desgaste de flanco tiene sobre las condiciones de mecanizado en seco en los aceros inoxidables austeníticos, se realizará a partir de un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es analizar la influencia que tiene el desgaste de flanco de la herramienta sobre el mecanizado en seco de aceros inoxidables austeníticos. Parte de este estudio se realizó con anterioridad en la citada Tesis de la profesora Marín [\[1\]](#).

Por otra parte, en este Proyecto se modificaron distintos aspectos del modelo numérico desarrollado en dicha Tesis [\[1\]](#) que se indican a continuación:

- Simplificación de la ley de fricción utilizada: En la Tesis doctoral se consideraron distintas leyes de fricción optándose finalmente por una ley híbrido variable de gran complejidad. No obstante, otras leyes más sencillas ofrecían resultados no muy distintos a los obtenidos con la ley híbrido variable.
- Utilización de la ecuación constitutiva del material AISI 316-L disponible en la librería del programa de elementos finitos empleado, DEFORM 2D, sin

modificaciones. En la Tesis indicada se modificó la ley constitutiva del material disponible en la librería en base al comportamiento del material a temperatura ambiente y a baja velocidad de deformación. En dichas condiciones, la resistencia del material ensayado fue entre el 25% y el 30% mayor que la correspondiente a la del material de la librería del DEFORM 2D. Las simulaciones desarrolladas en la Tesis se realizaron aplicando a la resistencia mecánica del material un coeficiente 1,275 independientemente de la temperatura y velocidad de deformación. Esta suposición puede introducir errores significativos.

- Aumento de la densidad de mallado en la zona de formación de la viruta respecto al modelo numérico desarrollado en la Tesis para la simulación de varias pasadas sucesivas. En la Tesis se determinó que era conveniente que los elementos de la malla en la zona de formación de la viruta tuvieran un tamaño del orden de 5 micrómetros. Sin embargo, en el modelo realizado para simular varias pasadas sucesivas, la malla tenía elementos con tamaño de 10 micrómetros. El modelo desarrollado en este proyecto permite simular 2 pasadas de corte, y en ambas, el tamaño de los elementos de la malla en la zona de mayor interés es de 5 micrómetros.

Además, en este proyecto se ha ampliado el estudio realizado en la Tesis doctoral [\[1\]](#) en los siguientes aspectos:

- Estudio completo de un caso adicional: herramienta con desgaste nulo (0 mm).
- Estudio completo de una segunda pasada para todos los niveles de desgaste de flanco (en la Tesis [\[1\]](#) únicamente se analizó el efecto de pasadas sucesivas para el flanco máximo: 0,8mm).



1.3. FASES DE DESARROLLO.

De forma muy esquemática y breve se resumen las fases de este proyecto

1. Establecimiento y comprensión del problema.
2. Documentación
3. Aprendizaje del manejo del software DEFORM 2D.
4. Realización de las simulaciones.
5. Análisis de los resultados.

En realidad estas fases se han ido realimentando y solapando entre sí durante todo el proceso, de manera que unas han servido de apoyo a las otras durante el mismo.

De manera paralela se ha ido redactando el presente documento.

1.4. MEDIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO.

El elemento principal con el que se ha contado para la consecución de este proyecto es el software de elementos finitos DEFORM 2D, en su versión 8.1.

Como soporte de este programa, se ha utilizado un ordenador portátil Intel Core i5, con tarjeta gráfica ATI Mobility Radeon de 1Gb.

Además se han consultado numerosas referencias bibliográficas, bien en formato papel o bien a través de Internet y que están reflejadas en el correspondiente capítulo.

1.5. ESQUEMA DE LA MEMORIA.

Considerando que facilita la comprensión del mismo, este proyecto se ha estructurado de la siguiente manera:



Capítulo 1: Es el presente capítulo, y en él se realiza una introducción al proyecto, se presentan los principales objetivos del mismo y se muestran tanto las fases de su desarrollo como los medios con los que se ha contado para llevarlo a cabo.

Capítulos 2 y 3: En ellos se expone el marco teórico del proyecto. Se explican los conceptos necesarios para la comprensión del trabajo, incluyendo aspectos relacionados tanto con el mecanizado (capítulo 2) como con el método de los elementos finitos (capítulo 3).

Capítulo 4: Se presenta el trabajo previo a este proyecto, de manera que cualquier referencia al mismo durante el desarrollo del trabajo, pueda ser fácilmente comprendida. Dado que dicho trabajo abarca un estudio para diferentes geometrías de corte y el proyecto solo se centra en una de ellas, se ha tratado de explicar más detalladamente las partes concernientes a esta geometría.

Capítulo 5: En este capítulo se explica de manera detallada como se realiza el trabajo de simulación. Se exponen los parámetros, las condiciones y todas las decisiones tomadas durante la simulación y se argumentan convenientemente.

Capítulo 6: Se exponen los resultados obtenidos tras el trabajo de simulación. Algunos de estos resultados se presentan de manera cuantitativa, acompañados de tablas y diagramas, y otros de manera cualitativa, acompañados de imágenes, para la mejora de su comprensión. Se realiza un análisis de los mismos.



Capítulo 7: Se muestran las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados, y el desarrollo del proyecto en general. Se añaden las que se consideran que serían líneas de trabajo interesantes para un futuro como complemento a este trabajo.

Capítulo 8: Refleja la bibliografía utilizada para la consecución del proyecto.

2. PROCESOS DE MECANIZADO.

2.1. ASPECTOS GENERALES.

El mecanizado es uno de los procesos básicos de fabricación más importantes. Casi todos los productos fabricados contienen componentes que requieren algún tipo de mecanizado, muchas veces de gran precisión.

El proceso de fabricación mediante mecanizado consiste en eliminar, en forma de virutas o partículas, el exceso de material de un semiproducto previamente concebido, para así conseguir la geometría, dimensiones y especificaciones deseadas en una pieza.



Figura 2.1: Imagen de un proceso de arranque de viruta [\[2\]](#)

Según la norma DIN 8580 estos procesos pueden clasificarse según la forma de la

herramienta cortante en:

- ✧ Arranque de viruta por medio de filos geoméricamente determinados.
- ✧ Arranque de viruta por medio de filos geoméricamente indeterminados, en el que el material es arrancado por material abrasivo que no tiene ninguna forma determinada.

Los procesos de mecanizado se llevan a cabo en máquinas herramienta, utilizando herramientas de corte y elementos de sujeción. En la máquina herramienta se colocan y sujetan las herramientas y las piezas a mecanizar. Las herramientas de corte deben cortar el material en forma de viruta, por lo que es preciso que soporten las fuerzas producidas en el corte y que presenten elevada dureza y resistencia al desgaste. Los elementos de sujeción permiten sujetar la pieza y la herramienta en la máquina.

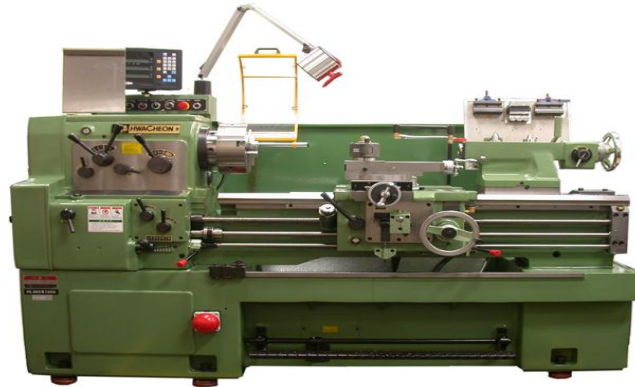


Figura 2.2: Imagen de una máquina herramienta. [3].

Para que se produzca el arranque de viruta deben realizarse movimientos relativos entre la pieza y la herramienta, de forma que se produzca una interacción entre ambas. Este movimiento relativo se consigue desplazando la pieza, la herramienta o las dos, dependiendo del tipo de mecanizado que se esté realizando.

De esta manera, los movimientos que aparecen durante el mecanizado son:

- Movimiento de corte: aquel que, sin movimiento de avance, solo arranca viruta durante una revolución o durante una carrera, dependiendo de si el movimiento es circular o rectilíneo respectivamente.
- Movimiento de avance: aquel que sitúa frente a la herramienta una nueva capa sin mecanizar. Combinado con el de corte hace posible el arranque continuo de virutas.
- Movimiento de penetración: aquel que determina la profundidad del corte y, por tanto, el espesor de la viruta que se arranca.

Para que el mecanizado sea lo más efectivo posible es necesario ajustar una serie de parámetros llamados parámetros o magnitudes de corte. Los tres más importantes, denominados fundamentales son:

- Velocidad de corte: Velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en dirección del movimiento de corte. Como el movimiento de corte puede ser rotativo o lineal, la velocidad de corte será la velocidad tangencial en la zona de contacto entre herramienta y pieza o la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta respectivamente.

Se mide en m/mm y se relaciona con la velocidad de giro a través de:

$$V_c = \frac{\pi n D}{1000}$$

donde:



- D es el diámetro máximo de la zona de contacto entre pieza y herramienta, en mm.
- n son las revoluciones por minuto a que gira la pieza o la herramienta, en rev/min.

- Avance: Distancia que recorre la herramienta en cada revolución o carrera.

Se mide en mm/rev o mm/carrera.

Conocidos este valor y el de velocidad de giro se puede calcular la velocidad de avance, definida como el desplazamiento de la herramienta respecto de la pieza en la dirección del movimiento de avance por unidad de tiempo. Ésta se mide en mm/min y se calcula como:

$$V_a = a \cdot n$$

- Profundidad de pasada: Distancia que penetra la herramienta en la pieza, en dirección perpendicular a la velocidad de avance.

Se mide en mm.

A partir del avance y la profundidad de pasada se determina la sección de viruta como:

$$S = a \cdot p$$

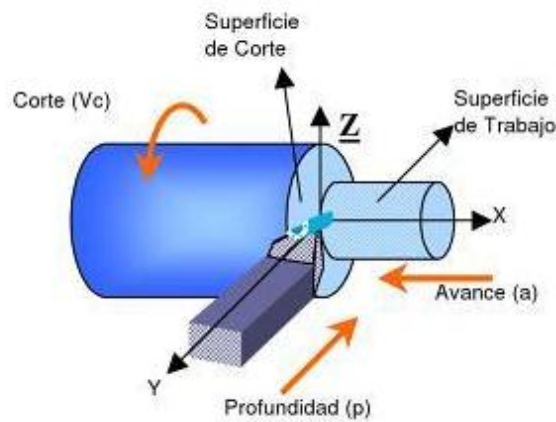


Figura 2.3: Movimientos y parámetros de corte en un torneado [4].

Dentro de los procesos de arranque de viruta el corte puede ser ortogonal u oblicuo. Estos se diferencian en el ángulo de inclinación del filo con respecto a la dirección del desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza. En el caso del corte ortogonal el filo es perpendicular a esta dirección y en el corte oblicuo existe un cierto ángulo. Debido a que este ángulo toma valores relativamente bajos (inferiores a los 15°), se considera que el estudio del corte ortogonal, mucho más simplificado, es una buena aproximación. Por esta razón, este será el tipo de corte al que se hará referencia de ahora en adelante.

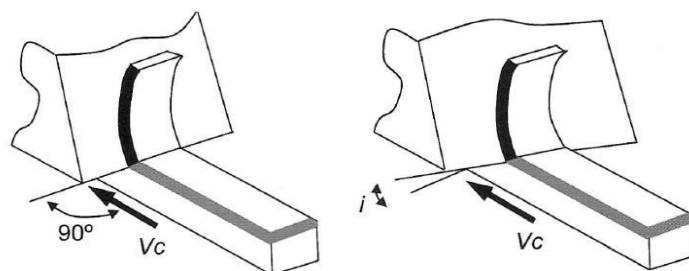


Figura 2.4: Representación esquemática de un corte ortogonal y oblicuo [5].



Los elementos característicos de una herramienta en el corte ortogonal son:

- Superficie de ataque o de desprendimiento: cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.
- Superficie de incidencia: cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.
- Filo o arista cortante. Intersección entre las superficies de incidencia y desprendimiento.

Los ángulos que definen la posición de las superficies anteriores son:

- Ángulo de incidencia (α): Ángulo formado por la superficie de incidencia de la herramienta y la superficie ya mecanizada de la pieza.
- Ángulo de desprendimiento (γ): Ángulo formado por la superficie de desprendimiento de la herramienta y el la perpendicular a la superficie ya mecanizada de la pieza.
- Ángulo de filo o herramienta (β): Ángulo formado por las superficies de incidencia y de desprendimiento de la herramienta.

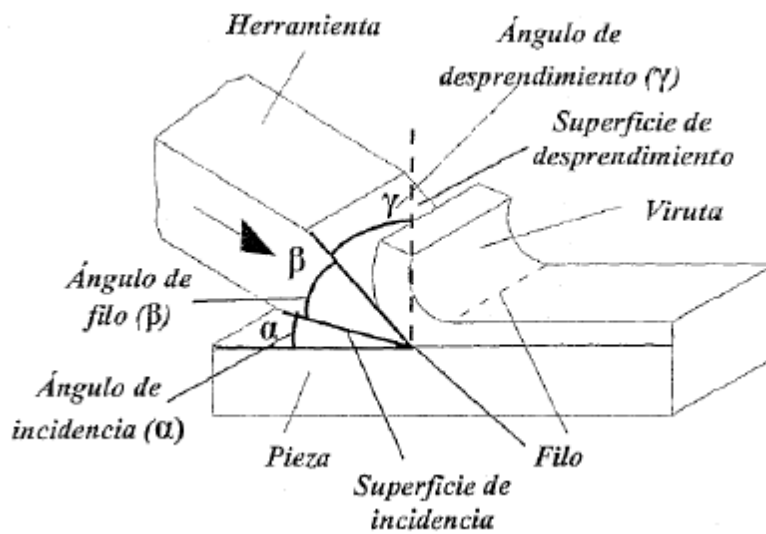


Figura 2.5: Ángulos y superficies características en el corte ortogonal [11]

La correcta elección de estos ángulos influirá notablemente en las fuerzas desarrolladas durante el corte, en la calidad superficial de la superficie mecanizada y en el desgaste de las herramientas. Así:

- ⤴ Si un ángulo de incidencia es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, y por tanto aumenta el rozamiento y la temperatura y, en consecuencia, se acelera el desgaste de la herramienta. Por el contrario, si es demasiado grande, se debilita el filo. El ángulo de incidencia toma siempre valores positivos y su elección correcta se hace en función del material de la pieza y de la herramienta.
- ⤴ Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando un mejor acabado superficial, pero queda muy debilitado el filo. Un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan. En general toma valores entre -5° y 30° , y su valor más adecuado será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse. Su elección estará condicionada por la



resistencia del material de la herramienta, el material a mecanizar y el avance.

- ♣ En función del valor del ángulo de desprendimiento, las herramientas de corte se clasifican en herramientas con geometría positiva cuyo ángulo de desprendimiento es mayor que cero y herramienta con geometría negativa las que el ángulo de desprendimiento es menor que cero.

2.2. EL PROCESO DE FORMACIÓN DE VIRUTA.

2.2.1. Mecanismos de formación de viruta.

El proceso de formación de viruta es básicamente un proceso de deformación plástica. Las fases en que se realiza son:

1. Recalcado: el material es desplazado por la herramienta, deformándose plásticamente.
2. Cizallado o corte del material: el esfuerzo cortante supera la resistencia del material en un plano, llamado plano de corte, por lo que resulta cortada una parte de viruta.
3. Deslizamiento o salida de la viruta: la viruta se desliza sobre la cara de desprendimiento de la herramienta, y en función del material y las condiciones de corte, se trocea en pequeñas porciones o se mantiene unida formando una viruta continua.

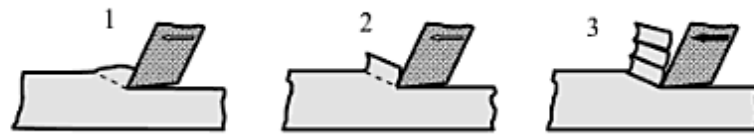


Figura 2.6: Fases de formación de la viruta [6].

Durante el proceso de formación de viruta existen una serie de zonas bien diferenciadas que se muestran en la siguiente figura y se detallan a continuación:

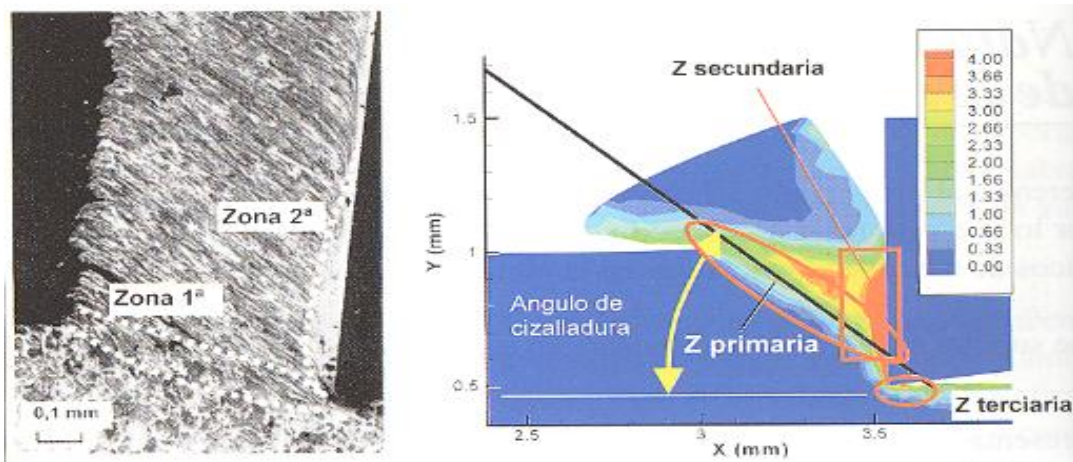


Figura 2.7: Zonas en el proceso de cizalladura [5].

➤ Zona de cizalladura primaria, situada delante del filo y con una orientación de ϕ grados sobre la superficie mecanizada. En esta zona se produce un cizallamiento severo del material, que sale en forma de viruta deslizándose a lo largo de la cara de desprendimiento. Puede aproximarse a un plano aunque es todo un volumen. La deformación del material en esta zona se traduce en una gran cantidad de energía de deformación que se convierte en calor.

✧ Zona de cizalladura secundaria, situada en la zona de la viruta sobre la cara de desprendimiento de la herramienta. En esta zona se produce un gran rozamiento entre viruta y herramienta debido a la presión y temperaturas alcanzadas, que llegan incluso en algunos casos a 1200 °C. Por este motivo el material se deforma en planos paralelos a la dirección de salida de la viruta.

✧ Zona de cizalladura terciaria, en esta región de dimensiones reducidas se produce una deformación de la superficie de la pieza similar a una laminación. El aplastamiento generalmente provoca que la rugosidad superficial disminuya respecto a la teórica, y puede inducir a tensiones residuales en la superficie mecanizada.

2.2.2. Tipos de viruta.

Es importante controlar la formación de viruta durante el mecanizado, ya que esto afectará en gran medida al acabado superficial de la pieza así como a la operación general de corte (vibraciones, traqueteo, desgaste de la herramienta...).

La formación de viruta depende del tipo de material a mecanizar, del material y geometría de la herramienta y de las condiciones de corte.

Así, se pueden principalmente distinguir tres tipos de viruta:

✧ Viruta discontinua: Es una viruta que se fragmenta en pequeñas porciones y se da en materiales frágiles, a bajas velocidades de corte y grandes avances y profundidades. Debido a la naturaleza discontinua de estas virutas, las fuerzas varían durante el corte y esto puede dar lugar a vibraciones, perjudicando el acabado superficial y las dimensiones finales de la pieza mecanizada, además de contribuir a un desgaste excesivo de la herramienta..

✧ Viruta continua: Se trata de una viruta larga y continua y se da en materiales dúctiles a altas velocidades de corte y pequeños avances y profundidades. Aunque generan buen acabado superficial, este tipo de viruta no siempre es deseable debido a que forma espirales que se enredan en los componentes de la máquina, molestando así en el proceso de mecanizado. Además, su continuidad entorpece su evacuación, transporte y almacenamiento. Para solucionar estos problemas se recurre a la incorporación de rompevirutas a la geometría del filo de la herramienta.

✧ Viruta segmentada: Son virutas semicontinuas, con aspecto de viruta serrada, con zonas de baja y alta deformación por cortante. Se da en metales con baja conductividad térmica y con una resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura.

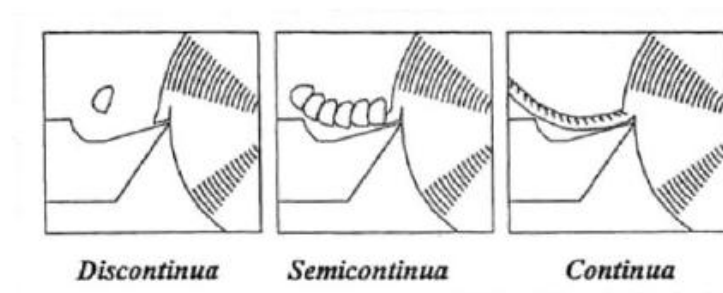


Figura 2.8: Diferentes tipos de viruta [11].

Además de estos diferentes tipos de viruta hay que tener en cuenta el fenómeno denominado filo recrecido. Se trata de un fenómeno que aparece generalmente con materiales dúctiles y a bajas velocidades. En estas condiciones se generan altas presiones en la zona de contacto entre la viruta y la herramienta que producen una soldadura de partículas entre viruta y cuchilla. De esta manera el material se va depositando de manera gradual sobre la herramienta, hasta que al agrandarse, esta

viruta se vuelve inestable y rompe, pudiendo provocar rotura o un desgaste pronunciado en la herramienta.. Parte de este material es arrastrado por el lado que ve la herramienta y el resto se deposita al azar sobre la superficie de la pieza. Como consecuencia, este fenómeno es uno de los factores que afecta de manera más adversa al acabado superficial durante el corte.

2.2.3. Temperatura.

Los fenómenos que suceden en el proceso de formación de la viruta generan calor, pudiéndose hacer la siguiente aproximación sobre su procedencia:

- El 80% es generado en la deformación del material en la zona primaria.
- El 18% se genera en la deformación de la zona secundaria y por la fricción de la herramienta en esta zona.
- El 2% se genera por el rozamiento de la punta de corte sobre la superficie de la herramienta.

Como consecuencia se generan elevadas temperaturas en la zona de corte, que afectan al rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Las mayores temperaturas se alcanzan en la superficie de desprendimiento de la herramienta, en zonas cercanas al filo.

Parte del calor generado en el mecanizado se disipa a través del ambiente y fluido de corte en el caso de utilizarse. El resto del calor se evacua:

- Por la viruta (80%)
- Por la herramienta (15%).

- Por la pieza (5%).

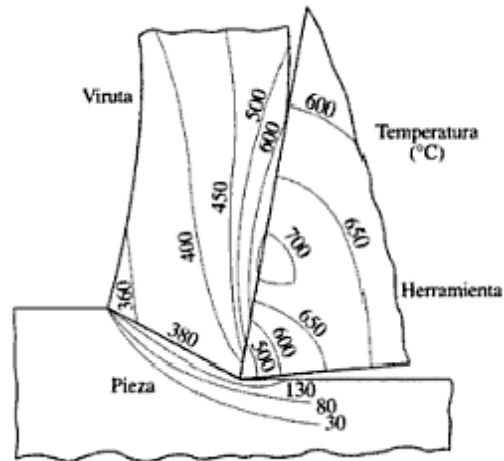


Figura 2.9: Distribución típica de temperaturas en la zona de corte. [7].

El reparto entre estos tres medios de disipación está muy relacionado con la velocidad de corte, como se muestra en la siguiente gráfica:

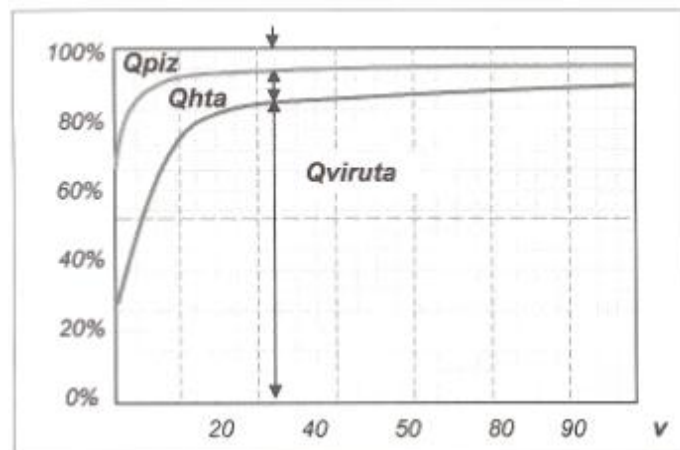


Figura 2.10: Reparto de la disipación del calor en función de la velocidad de corte. [5].

Como se puede apreciar, según aumenta la velocidad de corte el porcentaje de calor evacuado por la pieza y herramienta va disminuyendo y en consecuencia aumentando el porcentaje evacuado por la viruta. Esto es deseable ya que tanto la herramienta como la superficie de la pieza se verán menos afectadas por las altas temperaturas. Es necesario llegar a un punto de equilibrio, porque si bien el reparto de disipación del calor es más favorable con el aumento de la velocidad de corte, mayores velocidades de corte aumentan el calor total generado.

Para disminuir la temperatura de la herramienta se pueden tomar dos medidas principalmente, bien aumentar su sección (para facilitar la evacuación del calor) o bien refrigerar adecuadamente. Esto último se consigue mediante los fluidos de corte, que son capaces de alargar la vida de las herramientas, y conseguir un mejor acabado dado que permiten aumentar la velocidad de corte.

El agua es el mejor refrigerante, pero no un buen lubricante. Si lo primordial es refrigerar, se usa agua con aceites solubles (emulsiones o taladrinas), y si interesa lubricar, aceites de corte. Además, otras funciones de los fluidos de corte son eliminar las virutas y proteger a la pieza y máquina del óxido.

Sin embargo, por razones medioambientales, dado que el fluido de corte es un elemento altamente contaminante, su uso debe ser restringido lo máximo posible. Es por esto que en la actualidad la tendencia a seguir es el mecanizado en seco.

2.2.4. Rozamiento.

Uno de los fenómenos más difíciles de modelizar en los procesos de corte es el contacto viruta-herramienta, y en menor medida el contacto herramienta-superficie mecanizada.

En términos generales, cuando dos superficies son colocadas juntas, el contacto se establece únicamente entre los picos de unas pocas irregularidades en cada superficie. Al área cubierta por estas zonas de contacto se le denomina área real de contacto (A_r), y a la proyección de la superficie total se le denomina área aparente (A_a), como se muestra en la siguiente figura:

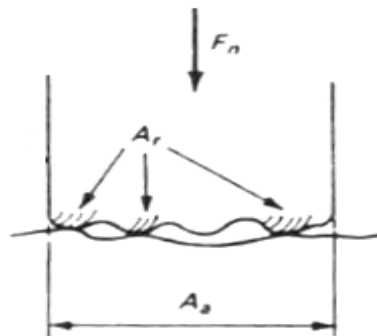


Figura 2.11: Contacto entre dos superficies.

En función de cómo varíe el área real como resultado de la interacción entre los dos cuerpos, se distinguen dos tipos de rozamiento:

- Rozamiento por adhesión: Debido a la existencia de presiones muy elevadas, que producen que el área real deforme plásticamente y se aproxime o llegue a igualar al área aparente. Estas presiones y las elevadas temperaturas ocasionan la formación de microsoldaduras entre las dos superficies, de forma que para que se produzca el deslizamiento se requiere una fuerza que produzca el continuo cizallado de las uniones soldadas.

La fuerza de rozamiento en este caso viene dada por:

$$F_r = \tau_r \cdot A_r = \tau_r \cdot A_a.$$

, donde τ_r es la tensión de cortadura del material más blando.

- Rozamiento por deslizamiento o de tipo Coulomb: En este caso la fuerza normal aplicada hace que el área real aumente, pero solo hasta que es capaz de soportar dicha carga en condiciones elásticas, cumpliéndose:

$$A_r = N / \sigma_y$$

, donde N es la fuerza normal y σ_y el límite elástico del material más blando. En este caso el rozamiento es independiente del área aparente de contacto y proporcional a la fuerza normal entre las dos superficies.

La fuerza de rozamiento en este caso viene dada por:

$$F_r = \mu * N$$

, donde μ es el coeficiente de rozamiento de Coulomb, y depende de las condiciones de operación (temperatura, humedad, presión ambiental), y es independiente de la velocidad de deslizamiento.

En el caso del mecanizado suele considerarse que en la zona de desprendimiento existen dos zonas con distintas leyes de fricción:

✎ La zona más cercana al filo, en la que las tensiones normales son muy elevadas, el material de la viruta se adhiere a la superficie de desprendimiento de la herramienta, de forma que la fricción corresponde a la resistencia de cizallado del material de la viruta. Se produce por tanto una fricción por adhesión. La altura de esta zona depende de la geometría de la herramienta, del material de la pieza y la herramienta y de las condiciones de corte.

✎ El resto de contacto viruta-herramienta, donde la viruta desliza sobre la

superficie de desprendimiento, responde a una ley de rozamiento tipo Coulomb.

En cuanto a la superficie de incidencia, no se considera la presencia de presiones normales muy elevadas, y por ello se asume un comportamiento de tipo Coulomb.

2.2.5. Fuerzas y velocidades desarrolladas.

Las fuerzas de reacción del material a mecanizar no actúan en el filo, sino en una zona tanto más alejada de él cuanto menor sea el ángulo de desprendimiento. La resultante de estas fuerzas (R) se puede descomponer en varias direcciones perpendiculares, dando lugar a las siguientes componentes de fuerza como se puede apreciar en la siguiente figura:

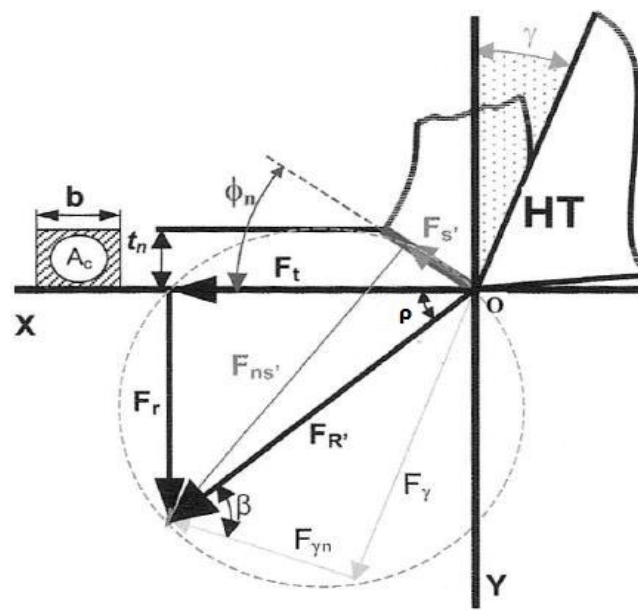


Figura 2.12: Descomposición de las fuerzas en el modelo de corte ortogonal. [5].

Si se descompone la fuerza resultante en la dirección del movimiento de corte se

obtiene:

- F_t : Fuerza de corte, en la dirección de la velocidad de corte V_c . Es fácilmente medible en la práctica y su valor nos proporciona la potencia de corte necesaria para el mecanizado.
- F_r : Fuerza de avance, en la dirección de la profundidad de corte. También fácilmente medible.

Si la fuerza resultante se descompone en la dirección de la cara de desprendimiento y su perpendicular:

- F_γ : Fuerza de fricción
- $F_{n\gamma}$: Fuerza normal a la cara de desprendimiento, que origina la compresión sobre la herramienta.

Por último, si la descomposición se realiza sobre la dirección del plano de cizalladura y su normal se tiene:

- F_s : Fuerza de cizalladura, que nos permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.
- F_{ns} : Fuerza normal al plano de cizalladura.

Vectorialmente se cumple:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_r = \mathbf{F}_\gamma + \mathbf{F}_{n\gamma} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{ns}.$$

Para la determinación del ángulo que la fuerza resultante forma con la superficie

mecanizada (ρ) se han desarrollado diversas teorías. La teoría de Merchant está muy extendida, y a partir de las hipótesis que plantea, obtiene una relación entre dicho ángulo y los ángulos de desprendimiento y cizalladura:

$$\rho = \pi/2 + \gamma - 2\phi$$

Como ya se ha indicado, el ángulo de cizalladura ϕ es aquel que el plano de cizalladura forma con la superficie mecanizada, es decir, según el cual se corta el material para formar la viruta.

Este ángulo se puede calcular a través del denominado factor de recalcado C_r , que se define como la relación que existe entre el espesor real (h') y teórico (h) de la viruta, distintas debido a la deformación producida en el corte. Así:

$$C_r = h' / h$$

$$\tan \psi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \sin \gamma}$$

Por último, cabe mencionar que, en el proceso de corte, además de la velocidad de corte intervienen otras dos velocidades. Estas son:

- La velocidad de deformación o cizallamiento, que es la velocidad de rotura de la viruta (V_s).
- La velocidad de la viruta, que es la velocidad de salida de la misma (V_v)

Estas se relacionan con la velocidad de corte también a través del ángulo de

desprendimiento y del de cizalladura:

$$V_s = (\cos \gamma / \cos (\phi - \gamma)) * V_c.$$

$$V_v = (\sin \gamma / \cos (\phi - \gamma)) * V_c.$$

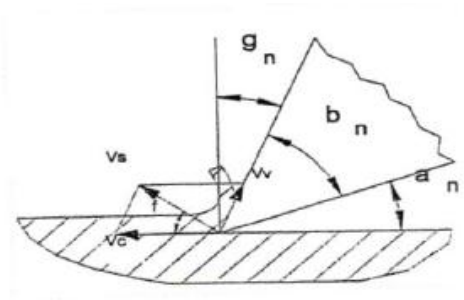


Figura 2.13: Velocidades en el modelo de corte ortogonal [11]

2.2.6. Tensiones residuales.

Debido a la enorme generación de calor y la deformación plástica durante el mecanizado se originan tensiones residuales en la superficie mecanizada de la pieza. Estas por tanto se dan por la combinación de efectos térmicos y mecánicos, que influyen en la distribución de las mismas en la superficie y en profundidad. El efecto térmico tiende a crear una capa traccionada en la superficie. Simultáneamente, el calentamiento lleva asociado el ablandamiento térmico del material, lo que está relacionado con un descenso del nivel de tensión de tracción en la superficie mecanizada.

Por otra parte, el efecto mecánico está asociado a la aparición de tensiones de compresión durante el mecanizado, que tienden a disminuir el nivel de tracción en la superficie mecanizada, lo que se relaciona con un mejor comportamiento mecánico

del componente durante su vida en servicio. El efecto mecánico también produce un incremento de tensiones residuales por compresión en profundidad.

La consideración de las tensiones residuales es importante debido a que afectan principalmente a la superficie de la pieza, zona crítica donde se produce la nucleación de fisuras de fatiga y la corrosión. Por ello las tensiones residuales afectan considerablemente a la vida del componente, cuando este se encuentra en servicio.

2.3. HERRAMIENTAS DE CORTE.

2.3.1. Materiales para las herramientas de corte.

Durante su utilización, las herramientas de mecanizado están expuestas a grandes cargas tanto de origen mecánico como térmico así como a diferentes mecanismos de desgaste. Por esta razón, los principales aspectos que deben reunir para su correcto diseño y fabricación son los siguientes:

- ✦ Alta dureza.
- ✦ Alta tenacidad y por tanto una elevada resistencia a la rotura frágil.
- ✦ Alta resistencia al desgaste.
- ✦ Alta estabilidad física y química a elevadas temperaturas, siendo de particular importancia el mantenimiento de la dureza.

Es importante tener en cuenta cómo influyen dos de estas características en la elección de los parámetros de corte en un determinado proceso. Así, la dureza y la velocidad de corte están directamente relacionadas, de manera que a mayor dureza es posible emplear mayores velocidades de corte. Del mismo modo la tenacidad se

relaciona con la sección de corte, ya que a mayor tenacidad mayores avances y profundidades de corte pueden emplearse.

Los principales materiales empleados en la fabricación de las herramientas son, ordenados de menor a mayor resistencia y dureza, los siguientes: Aceros rápidos, carburos o metales duros, óxidos o cerámicas, nitruros y diamante.

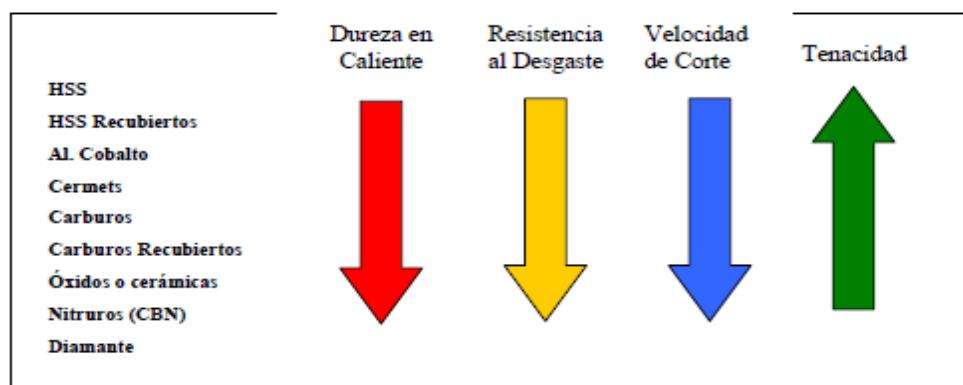


Figura 2.14: Comparación de propiedades de los materiales de corte.[\[1\]](#).

2.3.2. Metales duros. Carburo de Wolframio.

Las herramientas utilizadas en este proyecto son de carburo de wolframio (WC), comercialmente denominado carburo de tungsteno. Este material pertenece al grupo de los metales duros, que son aleaciones no férricas obtenidas por técnicas pulvimetalúrgicas. Se fabrican con diferentes carburos metálicos en un aglomerante en su mayor parte de cobalto. El carburo de tungsteno o wolframio (WC) es el más utilizado, pero también se usan el carburo de titanio (TiC), y el carburo de tántalo (TaC) o carburo de niobio (NbC) en menor medida.

Los metales duros varían considerablemente dependiendo de los componentes

utilizados, y las diferentes calidades existentes están determinadas por:

- Tipo y tamaño de las partículas duras
- Tipo y proporción del aglomerante.
- Técnicas de fabricación
- Calidad.

Generalmente las partículas duras varían en tamaño entre 1 a 10 micras, y suelen representar de un 60 a un 95% del volumen del material.

Las herramientas de carburo presentan elevada dureza en frío (70-80 HRC), y son muy resistentes al desgaste. Su gran ventaja respecto a los aceros rápidos es que pierden relativamente poca dureza con la temperatura (solo un 15% a 1000°C). Por esta razón nos permiten trabajar a elevadas velocidades de corte (200-500% mayores que con los aceros rápidos).

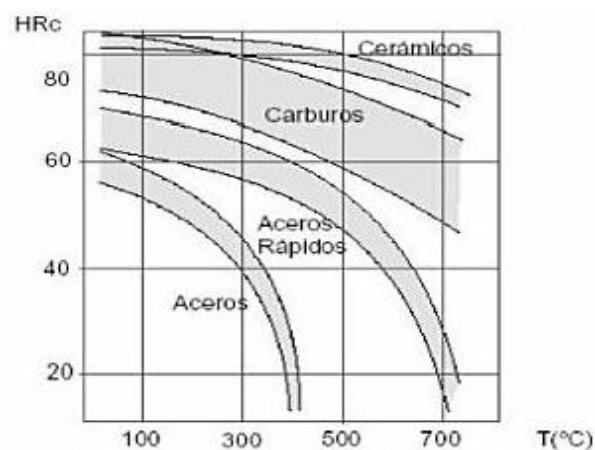


Figura 2.15: Evolución de la dureza frente a la temperatura para distintos materiales de corte [6].

Su desventaja principal respecto a los aceros rápidos es su baja tenacidad y su alto precio. Es por esta última razón por la que se emplean generalmente en forma de plaquitas soldadas o plaquitas intercambiables.



Figura 2.16: Diferentes plaquitas de metal duro [4].

Los metales duros son los materiales más empleados para la fabricación de herramientas, llegando a suponer un 70-80 % del total.

2.3.3. Desgaste de las herramientas.

Como resultado de la interacción con la pieza en las condiciones de corte impuestas, la herramienta va desgastándose de manera gradual. Los diferentes mecanismos de desgaste que se dan durante el mecanizado son la abrasión, adhesión, fatiga, difusión y oxidación.

La combinación de estos mecanismos genera los distintos tipos de desgaste en las herramientas. Los principales se describen a continuación:

- Desgaste de flanco de incidencia: Este tipo de desgaste es el más común en las operaciones de mecanizado. Se produce en la superficie de incidencia como consecuencia de la fricción entre pieza y herramienta. Se debe por tanto

principalmente a fenómenos de abrasión.

Es el resultado de una excesiva velocidad de corte, una insuficiente refrigeración y lubricación de la zona o una baja resistencia al desgaste de la herramienta.

La anchura de la zona de desgaste se considera como una medida del deterioro general de la herramienta, y puede ser determinada fácilmente por medio de un microscopio.

Su control es de gran importancia ya que, como se muestra en la siguiente figura, modifica la geometría de la herramienta, afectando con ello a las dimensiones y acabado de la pieza final; de hecho, se trata del tipo de desgaste que más influye en las dimensiones finales de la pieza mecanizada.

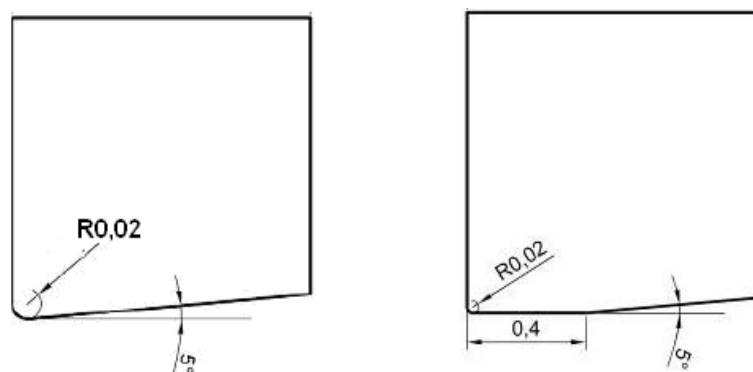


Figura 2.17: Esquema bidimensional de la herramienta sin desgaste y con desgaste de flanco 0.4mm. [1].

- Desgaste de cráter: En este caso el desgaste se produce en la cara de desprendimiento de la herramienta, en la que se genera un cráter por desprendimiento de material en dicha zona. Se debe a la acción simultánea de la fricción en el área de contacto viruta-herramienta, a la temperatura y a la afinidad entre los materiales de la pieza y la herramienta. Los mecanismos que tienen lugar por tanto son los de abrasión y difusión.



- Formación de filo recrecido: Este desgaste, como se comentó, consiste en la adhesión de material de la pieza mecanizada sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta, en la zona cercana al filo. Se debe a fenómenos de adhesión, y perjudica en gran medida el acabado superficial.
- Deformación plástica: Se da en presencia de elevadas presiones y temperaturas de corte que hacen que la herramienta deforme plásticamente.

Otros fenómenos de desgaste son:

- Desgaste de mella en la parte posterior de filo
- Fisuras térmicas
- Fisuras por fatiga mecánica
- Astillamiento del filo
- Fractura.

Los distintos tipos de desgaste se muestran en la siguiente figura:

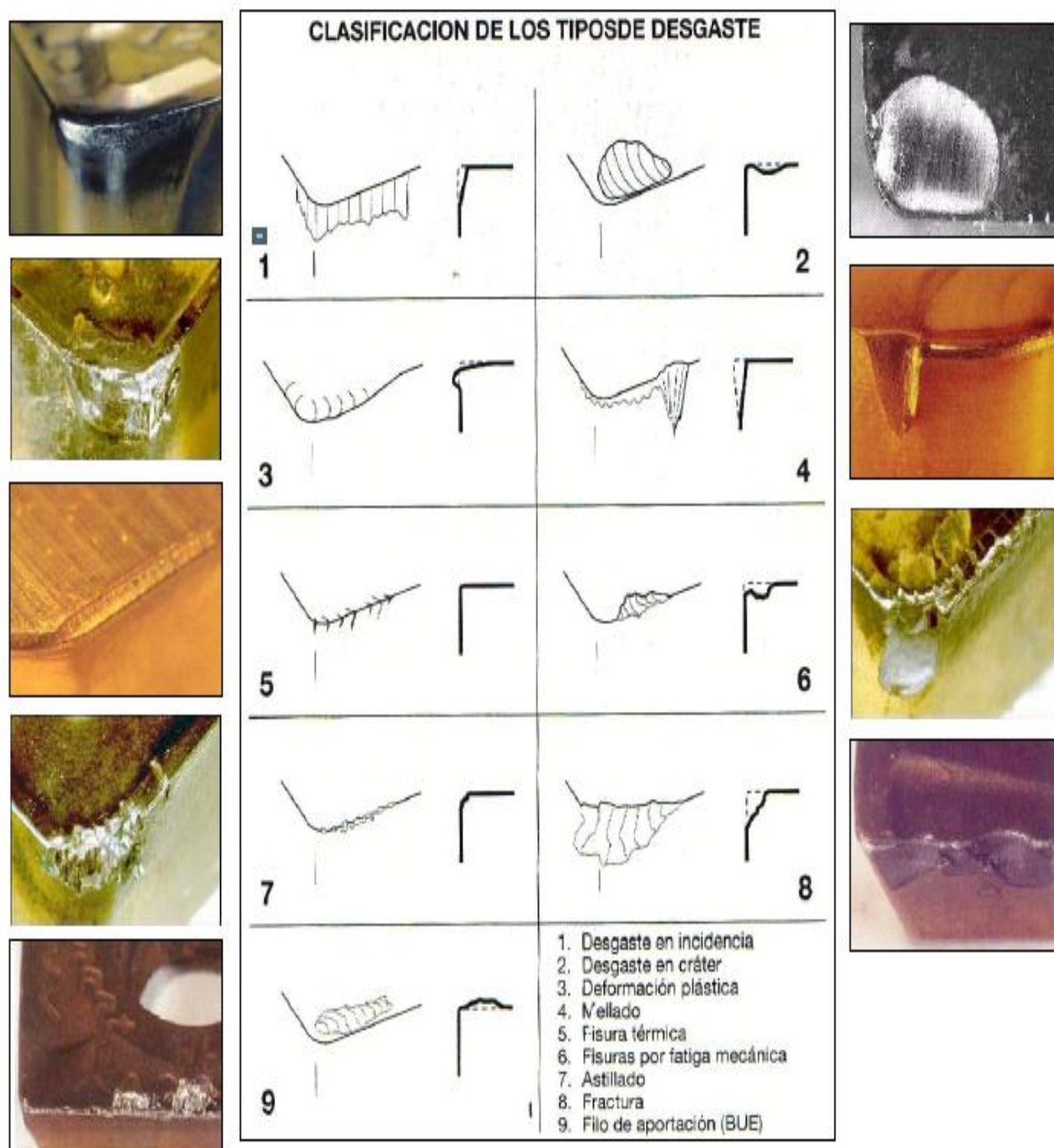


Figura 2.18: Tipos de desgaste de las herramientas de corte. [1].

2.4. MATERIALES MECANIZABLES.

2.4.1. Maquinabilidad

La maquinabilidad se define como la habilidad de un material para ser cortado, o la facilidad de cortar el material de una pieza con una herramienta de corte.

La maquinabilidad de un material se suele definir en función de cuatro factores:

1. Acabado e integridad superficial de la parte mecanizada.
2. Duración de la herramienta.
3. Requerimientos de fuerza y potencia.
4. Control de viruta.

Así, una buena maquinabilidad se traduce en un buen acabado superficial, bajos requerimientos de fuerza y potencia y larga vida de la herramienta.

La maquinabilidad depende de diversos factores como la máquina herramienta, la herramienta, los parámetros de corte o la lubricación, pero el factor más influyente es en sí el material que se va a mecanizar.

Los materiales más frecuentemente mecanizados son los metales. La mayoría pueden conformarse por arranque de viruta, aunque a veces es necesario aplicarles algún tratamiento térmico previo. Los diferentes grupos de metales que se mecanizan son:

1. Aceros al carbono.
2. Aceros de baja aleación y alta aleación.

3. Aceros inoxidables.
4. Fundiciones.
5. Aleaciones termorresistente y de alta resistencia.
6. Aleaciones de aluminio, níquel, titanio...
7. Metales refractarios aleados.

Además también se mecanizan otros grupos de materiales como plásticos, fibra de vidrio, composite, carbonos y grafitos, etc.

2.4.2. Aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables son un grupo de aceros aleados, cuyo principal componente de aleación es el cromo (Cr), con un contenido del mismo por encima del 12%. Además, los aceros inoxidables suelen contener importantes cantidades de otros elementos de aleación que mejoran sus propiedades.

Los aceros inoxidables se caracterizan por su alta resistencia a la corrosión. Esto se consigue gracias al cromo, que en presencia de oxígeno, forma una capa de óxido de cromo que protege al metal. Además, son de destacar su elevada ductilidad y su resistencia a altas y bajas temperaturas.

Los aceros inoxidables están divididos en varios grupos de acuerdo con la microestructura básica formada y con la posibilidad de endurecimiento por tratamiento térmico. Los grupos principales son: martensíticos, ferríticos, austeníticos, dúplex y endurecidos por precipitación.

- Aceros inoxidables martensíticos: Su contenido en cromo puede alcanzar el 18% .Son magnéticos y su resistencia a la corrosión es baja comparada con los otros

tipos. Pueden ser endurecidos por tratamiento térmico y tienen una elevada resistencia, dureza, resistencia a la fatiga, y buena ductilidad. Se utilizan generalmente en cuchillería, herramientas quirúrgicas, etc. Los más comunes son: AISI 410, AISI 420 y AISI 440.

- Aceros inoxidables ferríticos: Estos aceros contienen un elevado contenido en cromo, pudiendo alcanzar un 30%. Son magnéticos y tienen una mejor resistencia a la corrosión que los martensíticos. Se endurecen por trabajo en frío pero no pueden someterse a tratamientos térmicos. Generalmente se utilizan para aplicaciones no estructurales, como equipos de cocina o decoraciones automotrices. Su coste es bajo por no contener níquel. El AISI 430 y el AISI 436 son los más representativos de este grupo.

- Aceros inoxidables austeníticos: Son los aceros inoxidables más utilizados, pues son los que mejor resistencia a la corrosión presentan. Están aleados al cromo (16 al 25%) y al níquel (7 al 20%). No son magnéticos y endurecen por trabajo en frío.

En general, los aceros inoxidables austeníticos son un grupo de materiales de baja maquinabilidad. Esto se debe principalmente a su tendencia de endurecimiento por deformación, que genera tensiones residuales en la pieza, su baja conductividad del calor y la tendencia a formación de filo de aportación.

Sin embargo su uso está muy extendido en componentes de elevada responsabilidad, debido a sus excelentes propiedades mecánicas unidas a una elevada resistencia a corrosión.

Los aceros de la serie 300 (AISI 304, AISI 302, AISI 304L, AISI 310, AISI 316, AISI 316L, AISI 317, AISI 321 y AISI 347) son los más significativos de este grupo, siendo el AISI 304 el más ampliamente usado y representativo.

- Aceros inoxidables dúplex: Son una combinación de los inoxidables austeníticos y de los ferríticos. Poseen muy buena resistencia tanto a la corrosión como al agrietamiento por esfuerzo corrosivo. Los más representativos son el tipo 2205 y el S31803, y las aplicaciones típicas se encuentran en componentes de plantas de intercambio de aguas e intercambiadores de calor.
- Aceros Endurecidos por Precipitación: Contienen cromo y níquel además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen una elevada resistencia a temperaturas altas, así como buena ductilidad y buena resistencia a la corrosión. Se suelen utilizar en componentes estructurales de aeronaves y vehículos espaciales.

Para la designación de los aceros inoxidables se utilizan tres clasificaciones generales:

- ✧ Estructura metalúrgica.
- ✧ Sistema Unificado, desarrollado por Sociedad americana para Pruebas de Materiales (ASTM) y la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE)
- ✧ Sistema AISI (Instituto Americano de la Siderurgia, American Iron and Steel Institute) que establece la clasificación de los aceros inoxidables en los tres grupos siguientes:

El acero utilizado en este proyecto es el AISI 316L, un acero inoxidable austenítico ampliamente utilizado y con un conjunto de propiedades que lo convierten en un acero de alta resistencia.

Su composición se indica en la siguiente tabla:

Componente	Norma AISI			
	304	304L	316	316L
Carbono (máx.)	0,08	0,03	0,08	0,03
Cromo	18-20	18-20	16-18	16-18
Níquel	8-12	8-12	10-14	10-14
Molibdeno	—	—	2-3	2-3
Manganeso (máx.)	2	2	2	2
Fósforo (máx.)	0,045	0,045	0,045	0,045
Azufre (máx.)	0,030	0,030	0,030	0,030
Silicio (máx.)	1	1	1	1

Las cantidades se expresan en porcentaje (p/p) del elemento.

Figura 2.19: Composición del acero AISI 316L

Y entre estas propiedades destacan:

- ✧ Elevada resistencia a la corrosión.
- ✧ Elevada conformabilidad.
- ✧ Buenas características mecánicas.
- ✧ Elevada resistencia a la fluencia.
- ✧ Elevada tenacidad.
- ✧ Buena resistencia al desgaste.
- ✧ Buena resistencia a solicitaciones por fatiga.

3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método muy potente para la resolución de problemas de ingeniería de muy diversa índole. Su uso está muy extendido debido a que permite resolver casos que, debido a su gran complejidad analítica y de cálculo, eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales hasta hace poco tiempo. La evolución de estos métodos ha ido en consonancia con el desarrollo de los medios informáticos debido a la gran capacidad de cálculo que estos proporcionan.

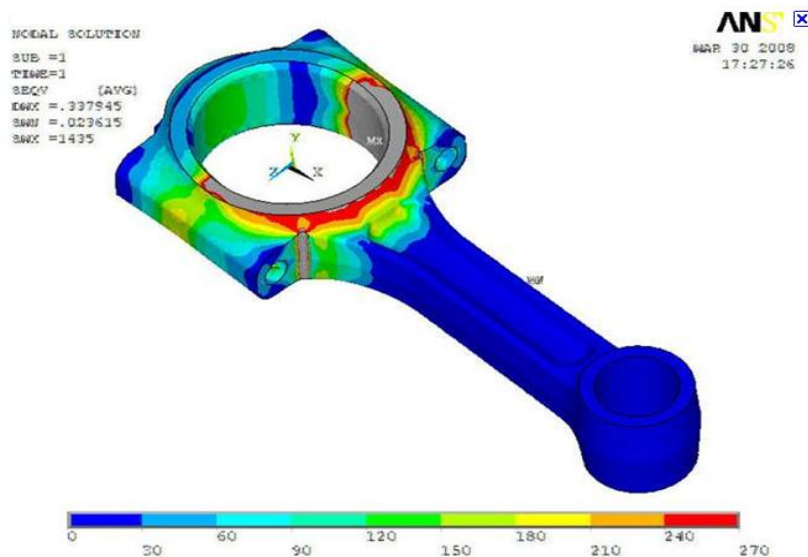


Figura 3.1: Simulación del comportamiento de una biela a través de elementos finitos. [16].



El método de los elementos finitos podría definirse como un procedimiento general de resolución por discretización de problemas continuos y planteados con expresiones definidas matemáticamente. Se basa en los siguientes principios:

- ✧ Una función continua se puede aproximar a un sistema de funciones finitas, mediante el cual se puede llegar a una solución equivalente de dicha función continua.
- ✧ El dominio del problema se divide en un número finito de partes denominadas elementos.
- ✧ Cada elemento está definido por una serie de puntos llamados nodos que a la vez constituyen los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- ✧ El conjunto de los nodos, considerando las relaciones de adyacencia, se denomina malla.
- ✧ Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- ✧ El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las funciones de forma.
- ✧ La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por el ensamblaje de los elementos.
- ✧ La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza la convergencia en la solución.

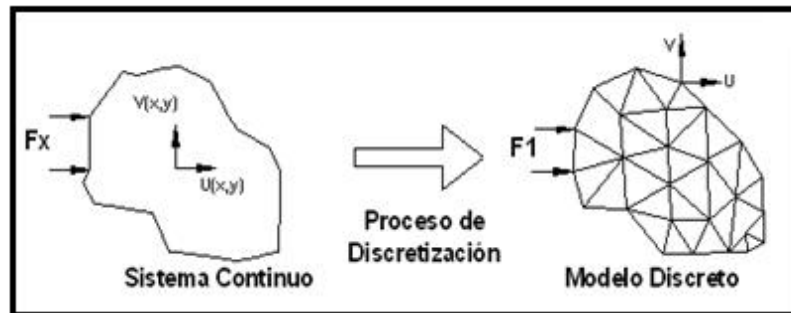


Figura 3.2: Esquema del proceso de discretización llevado a cabo en el MEF.

El MEF se basa por tanto en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto, denominándose a esta transformación discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo es aproximado y se obtiene como interpolación de los valores conocidos en los nodos. Se trata por tanto de una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Por esta razón, cuanto mayor sea el número de elementos, o lo que es lo mismo, cuanto mayor sea la densidad de la malla, la solución numérica calculada convergerá más rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Así en zonas en las que se prevean altos gradientes de la propiedad analizada, el tamaño de los elementos deberá ser lo suficientemente pequeño.

Además de la falta de exactitud debido a las aproximaciones matemáticas, también existe una fuente de error debido a la capacidad del ingeniero para crear correctamente el modelo de la simulación. Por esto uno de los principales objetivos de éstos una vez que generan un modelo en elementos finitos, consiste en validarlo, esto es, realizar una serie de simulaciones que revelen la proximidad de los



resultados con los experimentales. Desde que este método se empezó a utilizar, siempre se ha buscado encontrar una solución de compromiso en cuanto a su validación, ya que, una vez conseguida una aproximación aceptable, el resto de trabajo se simplifica enormemente.

Utilizar un programa de elementos finitos posibilita reducir el número de ciclos prototipo-pruebas-ensayos-evaluación en la mejora de un proceso o en la obtención de un nuevo producto. Esto permite una importante reducción de tiempos y costes y un aumento de la calidad.

Existen diversos programas informáticos que implementan el análisis mediante elementos finitos, tales como ABAQUS, ANSYS y DEFORM entre otros. Todos ellos incluyen tres módulos principales: el pre-procesado, el análisis y el post-procesado:

1. Pre-procesado: Es el módulo de definición del problema. Aquí se realiza el diseño de las geometrías y del mallado y se definen las propiedades de los materiales, las zonas y leyes de contactos y las condiciones de contorno.
2. Análisis: En este módulo también denominado como “solver” es en el que se realiza la parte iterativa y matemática en la que se basa el MEF.
3. Post-procesado: En esta fase se procede al estudio de los datos y resultados obtenidos. La mayoría de los programas informáticos actuales incluyen un post-procesador en el que se muestran gráficamente los resultados, siendo así más sencilla su interpretación.

4. MARCO DEL PROYECTO: TRABAJOS PREVIOS

Este proyecto surge a partir de la siguiente Tesis doctoral: 'ANÁLISIS TERMOMECAÍNICO DE LA INFLUENCIA DEL DESGASTE GEOMÉTRICO DE LAS HERRAMIENTAS EN PROCESOS DE CORTE ORTOGONAL DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS'. Por ello se dedicará este capítulo a resumir las partes más relevantes de la misma, profundizando en aquellas que se relacionan de manera directa con el presente proyecto.

La Tesis doctoral forma parte de la investigación realizada en el marco de los proyectos CYCIT con referencia DPI2005-08018 y CAM-UC3M CCG08-UC3M/DPI-4494, y desarrollado dentro del Grupo de Tecnologías de Fabricación y Diseño de Componentes Mecánicos y Biomecánicos (FabDis) de la Universidad Carlos III de Madrid.

Esta Tesis se centra en el estudio termomecánico del efecto que tiene el desgaste geométrico de la herramienta en el torneado en seco de aceros inoxidables austeníticos, más concretamente del AISI 316L. El estudio abarca todos los tipos de desgaste geométricos existentes y para cada uno de ellos considera distintos niveles de desgaste y condiciones de corte. El siguiente cuadro recoge todos los casos estudiados:

Herramienta	Condiciones de corte: <i>V_c (m/min) / a (mm/rev.)</i>			
	120 /0,1	120/0,05	240/0,1	240/0,05
Sin desgaste	X	X	X	X
Flanco 0,4	X	X	X	X
Flanco 0,8	X	X	X	X
Cráter 0,04	X	X	X	X
Cráter 0,08	X	X	X	X
Radio 0,05	X	X	X	X
Radio 0,08	X	X	X	X
Recrec. 0,2	X	X	X	X
Recrec. 0,5	X	X	X	X
Chaflán 0,075	X	X	X	X
Chaflán 0,15	X	X	X	X
Flanco-Red.	X	X	X	X
Flanco-Chaflán	X	X	X	X

Figura 4.1: Casos recogidos por la Tesis para su estudio.

Como se puede apreciar los casos estudiados son herramienta sin desgaste y herramienta con los siguientes tipos de desgaste: desgaste de flanco, desgaste de cráter, recrecimiento de filo, redondeo de arista, chaflán y desgastes combinados flanco-redondeo de arista y flanco-chaflán. Además cada desgaste se estudia a dos niveles. Los que posteriormente se estudiarán en este proyecto se han señalado con un círculo rojo.

De forma esquemática el trabajo realizado en la Tesis es el siguiente:

1. Trabajo experimental:

1. Medida experimental de las fuerzas de mecanizado y tensiones residuales para las diferentes condiciones de corte y tipos de desgaste.



2. Trabajo simulación

1. Generación de un modelo numérico en 2D para el caso de la herramienta sin desgaste y las cuatro condiciones de corte, y adaptación del mismo utilizando los valores obtenidos de manera experimental.
2. Modelización numérica del resto de tipos de desgaste en las cuatro condiciones de corte utilizando el modelo adaptado.
3. Obtención de las fuerzas de mecanizado y tensiones residuales en todos los casos.
4. Análisis de otros resultados que no pueden ser medidos experimentalmente.

3. Validación del modelo numérico.

4. Análisis numérico de una segunda pasada y de una modelización en 3D para determinar qué efecto tienen estas simplificaciones en las diferencias observadas entre las medidas reales y las obtenidas a través del modelo.

A continuación se desarrollarán en mayor profundidad estos puntos.

4.1. TRABAJO EXPERIMENTAL.

El trabajo experimental se divide en dos grandes apartados:

1. Ensayos de mecanizado con herramientas con geometría correspondiente a diferentes tipos y niveles de desgaste. Medida de las fuerzas de corte y avance generadas.



El material mecanizado corresponde a tubos sin soldadura de 28 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor, de acero AISI 316L.

Las herramientas de corte empleadas son de plaquita intercambiable, previamente generadas gracias a una metodología que permitió obtener mediante electroerosión por hilo herramientas de corte con geometrías correspondientes a distintos niveles de los principales tipos de desgaste. El material de las herramientas es carburo de wolframio (91%WC, 9% Co). Por último, el porta plaquitas estaba instrumentado mediante galgas extensométricas para la medida de las fuerzas de corte y de avance.

Los ensayos de corte consistieron en el desplazamiento de la herramienta de corte en dirección paralela al eje de giro de la pieza, eliminando los 2 mm de espesor del tubo en una única pasada. Se trata de un mecanizado ortogonal ya que el filo de la herramienta está orientado perpendicularmente al eje de giro de la pieza.

Todos los ensayos se realizan en seco, empleando un dispositivo de refrigeración por aire con objeto de enfriar la pieza y la herramienta después de cada ensayo.

Además se establece el mismo tiempo de corte para todas las condiciones (2 segundos), ya que se considera que este tiempo es suficiente para alcanzar condiciones estacionarias en la zona de corte, pero al mismo tiempo, es suficientemente pequeño para evitar un desgaste significativo de la herramienta.

2. Medida de tensiones residuales de la pieza mecanizada en los ensayos anteriores, tanto en la superficie como en profundidad mediante el método de difracción de rayos X.

4.2. TRABAJO DE SIMULACIÓN.

Para el trabajo de simulación, por elementos finitos, se utiliza el software DEFORM 2D.

El primer paso de este trabajo consiste en la generación de un primer modelo numérico para el caso de la herramienta sin desgaste, con el que se simularán las cuatro condiciones de corte.

Para la correcta generación de este modelo numérico inicial, es necesario realizar análisis de sensibilidad para optimizar los mallados de la pieza y la herramienta, así como establecer la ley de comportamiento del material y un modelo de fricción adecuado en las zonas de contacto.

En esta tesis la ley de comportamiento del material utilizada en el modelo numérico ha sido adaptada utilizando los datos del fabricante del material ensayado. En cuanto a la ley de fricción se utiliza inicialmente una ley con coeficiente de adhesión constante para todas las superficies de contacto.

Para mejorar este modelo y adaptarlo de forma que represente mejor las condiciones reales de mecanizado, se realizan variaciones del mismo que ajusten los resultados a los obtenidos experimentalmente. Los dos factores, que se estudian para el efecto son los siguientes:

- Acomodación de filo: En la realidad, durante los primeros instantes del proceso de mecanizado, se produce un súbito y ligero desgaste de flanco, de aproximadamente 0.05mm, al que se denomina acomodación de filo. Aunque es un hecho común en todos los procesos, generalmente no se tiene en cuenta en los modelos numéricos. En la Tesis, se han realizado simulaciones para las cuatro condiciones de corte y el caso de la herramienta sin desgaste incluyendo este efecto. Se han comparado los resultados obtenidos de esta



manera y los obtenidos sin tener en cuenta este efecto y se ha concluido que la consideración de la acomodación de filo mejora los resultados numéricos con respecto a los experimentales.

- Ley de fricción: Igualmente se estudia qué ley de fricción, aplicada en el contacto viruta-superficie de desprendimiento, permite aproximar mejor el comportamiento del modelo a la experiencia real. Para ello realizan simulaciones, igualmente para las cuatro condiciones de corte y para la herramienta sin desgaste, utilizando diferentes leyes de fricción, así como diferentes coeficientes para cada una. Las leyes simuladas son:
 - Ley de tipo Coulomb, con coeficientes de rozamiento constante 0.3, 0.5, 0.8.
 - Ley de tipo adhesivo, con coeficientes de cizalladura constante 0.3, 0.5 y 0.8.
 - Ley de fricción variable, con coeficientes de rozamiento y cizalladura variables con la presión normal. Esta ley de fricción, establece dos zonas de contacto, correspondientes a zonas de fricción y deslizamiento.

Comparando las fuerzas obtenidas con los resultados experimentales, se concluye que la media de errores cometido con respecto a la realidad es más baja utilizando la ley de fricción híbrido variable, los coeficientes de Coulomb de 0.5 y 0.8 y el coeficiente de adhesión de 0.8. Si bien los resultados son muy parecidos entre sí, en la Tesis se decide utilizar la ley híbrido variable, por considerar que, como modelo, representa de manera más realista las condiciones de contacto que se producen en el mecanizado.

En cuanto a la zona de contacto pieza- superficie de incidencia, se establece un coeficiente de tipo Coulomb por no considerar la existencia de altas presiones normales. Se utiliza un coeficiente de 0.4 por ser un coeficiente típico en un contacto de este tipo entre estos dos materiales.

Una vez generado este modelo óptimo, se utiliza para simular el resto de las geometrías, y obtener a partir de dichas simulaciones tanto las fuerzas de mecanizado, como otras variables imposibles de obtener a través de la metodología experimental, tales, como espesor de viruta, temperaturas máximas, etc.

4.3. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PREVIO.

Para el ajuste del modelo numérico desarrollado en la Tesis se emplearon las fuerzas de mecanizado experimentales correspondientes a los ensayos realizados con herramientas sin desgaste. Ahora se validará el modelo para el resto de las geometrías.

La validación se lleva a cabo a través del cálculo de la diferencia o error medio aritmético. Este error se obtiene con los valores absolutos de las diferencias puntuales obtenidas en fuerza de corte, fuerza de avance y con la relación de fuerza F_a/F_c :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|}{n} \quad \varepsilon_i = \frac{v.\text{modelo} - v.\text{ensayo}}{v.\text{ensayo}} \times 100\%$$

Tras la realización de todos los cálculos se concluye que el modelo es válido para herramientas con geometrías relativas a un único tipo de desgaste, quedando descartadas las herramientas con geometría del tipo combinado.

4.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE VARIAS PASADAS:

Se analiza el efecto que tiene la simulación de varias pasadas sucesivas sobre los resultados del modelo numérico. Para ello se simulan varias pasadas para todas las condiciones de corte y geometría de herramienta en ausencia de desgaste (considerando acomodación de filo) y varios tipos de desgaste a modo comparativo.

Dado que realizar más de una pasada genera variaciones mecánicas (endurecimiento por deformación, generación de tensiones residuales) y térmicas (aumento de temperatura), se cuantifica qué efecto tiene cada uno de éstas, tanto por separado como de forma conjunta, en las fuerzas de mecanizado desarrolladas.

Además se establece en qué casos se mejoran los resultados numéricos, y en cuales se aumentan las diferencias de éstos respecto a los experimentales.

Por último se realiza la apreciación de que las variaciones de las distintas magnitudes consideradas, al aumentar el número de pasadas de corte simuladas, se produce principalmente entre la 1ª y la 2ª pasada, siendo pequeñas las variaciones al simular pasadas de corte adicionales. Por tanto, se concluye que es muy recomendable desarrollar modelos que simulen 2 pasadas de corte sucesivas para conseguir que el comportamiento del modelo se ajuste de forma adecuada al experimental.

Para concluir se genera un modelo numérico en 3D para determinar el efecto que se produce al imponer condiciones de deformación plana.



Como conclusión más relevante se obtiene que la modelización 2D desarrollada en la Tesis, explica en parte el principal error encontrado en la predicción de fuerzas: excesivo aumento de la fuerza de avance para determinadas geometrías de herramienta.

En cambio, la simulación de pasadas sucesivas con los modelos 3D ha mostrado resultados similares a los obtenidos con los modelos 2D.

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

DEFORM 2D es un código basado en elementos finitos diseñado para analizar procesos de conformado y tratamientos térmicos. Simular estos procesos de fabricación por ordenador permite a los diseñadores reducir el coste y tiempo de ensayos y prevenir errores en el rediseño de herramientas y procesos.

DEFORM 2D emplea modelos numéricos de formulación Lagrangiana, caracterizados por la deformación de la malla computacional con el material, en contra de lo que ocurre con el método Euleriano. Esto permite modelizar la formación de viruta desde el inicio del proceso hasta el estado estacionario, sin necesidad de predeterminedar su forma a partir de la experiencia.

Además posee un sistema de remallado automático durante el cálculo, diseñado para problemas que requieren grandes deformaciones. Este remallado automático y continuo permite mantener la calidad de la malla durante la simulación, con una menor distorsión. También permite mantener un mallado denso en las zonas de interés, tanto en la herramienta, como en la pieza, a pesar del movimiento de la pieza durante la simulación.

DEFORM 2D permite realizar análisis en 2 dimensiones, asumiéndose condiciones de deformación plana. En estas condiciones el modelo se define en un plano, y durante la simulación, se asume que el flujo del material se produce en dicho plano y es idéntico en todos los planos paralelos al plano de análisis. En los procesos de corte ortogonal el material no puede deformarse en la dirección del filo de la herramienta

por lo que la viruta no puede desplazarse lateralmente. Por esta razón, la modelización en dos dimensiones se considera una simplificación adecuada para los procesos de corte ortogonal.

DEFORM también ofrece versiones de simulación en 3D. Éstas permiten simular de forma más realista la formación de rebabas y la variación del ancho de la viruta durante el mecanizado, pudiéndose modelizar también casos de corte oblicuo. Sin embargo, la dificultad en la obtención de un mallado suficientemente denso en los modelos 3D, además del tiempo de cálculo y la capacidad del equipo necesaria son algunas de las desventajas que presenta este tipo de modelización, por lo que los modelos 2D siguen utilizándose y sirviendo de punto de referencia en la investigación de los procesos de mecanizado.

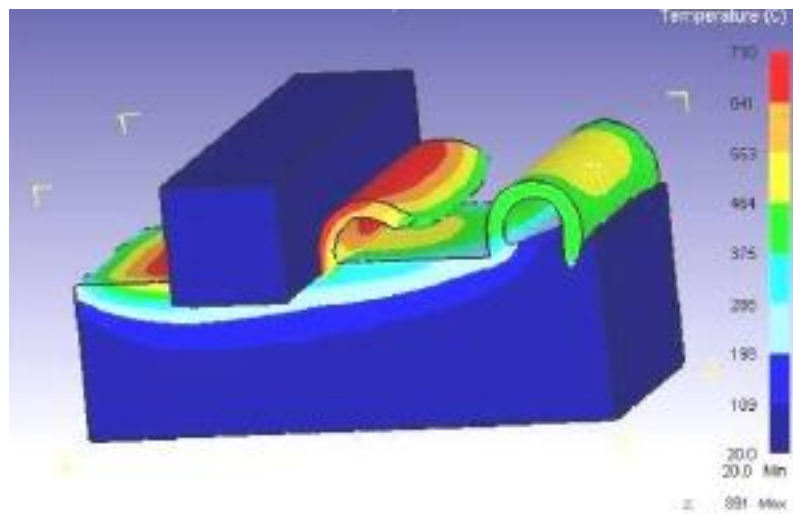


Figura 5.1: Muestra de una modelización numérica de dos pasadas en 3D [1].

A través de la pantalla inicial de DEFORM 2D es posible acceder a las distintas acciones y casos que se ejecutan en la simulación. Ésta se muestra a continuación:

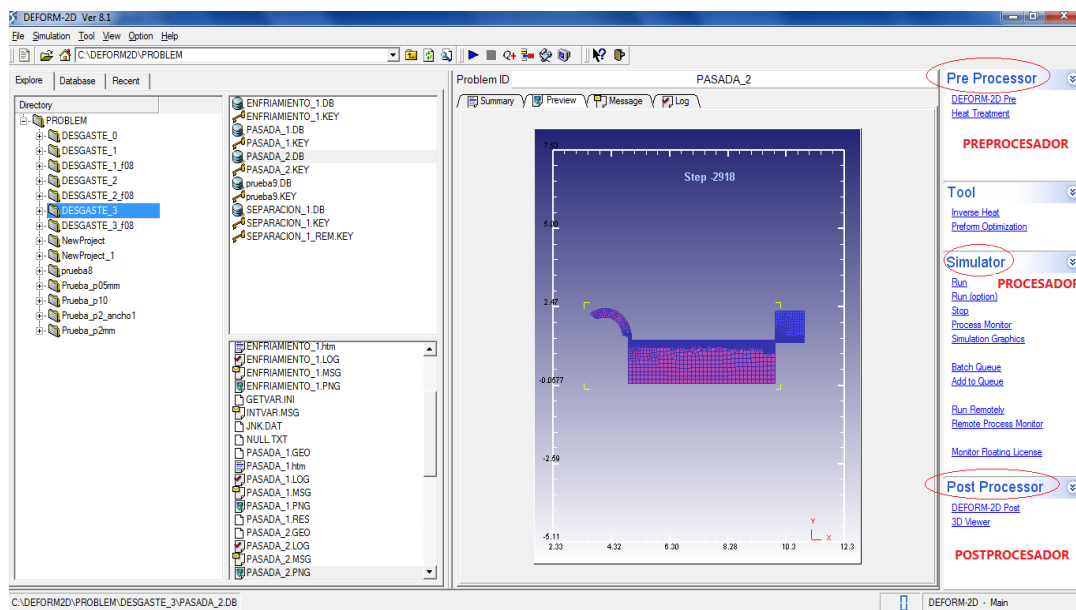


Figura 5.2: Pantalla principal del DEFORM 2D.

Se pueden apreciar los tres módulos que existen de forma general en los programas de simulación por elementos finitos:

- Preprocesador, para la configuración del modelo.
- Procesador, en el que el programa realiza las iteraciones y cálculos necesarios para el análisis del problema planteado.
- Postprocesador, que permite el acceso a los resultados y facilita su análisis.

DEFORM 2D incorpora un software asistente denominado MACHINING CUTTING. Este asistente es una aplicación específica incluida para la simplificación

del pre-procesado de la simulación del corte ortogonal. Simplifica la parte más compleja del trabajo de pre-procesado como es la creación de geometrías o la aplicación de condiciones de contorno. Por ello, la forma recomendada de trabajar es modelizar el problema a través de este asistente y posteriormente pasar al módulo general de pre-procesado y afinar la definición de la totalidad de los parámetros, como ventanas de mallado o relaciones de contacto.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El proceso concreto que se pretende simular es el de un mecanizado ortogonal, sobre tubos de 28mm de diámetro y 2 mm de espesor, cuyo material es el acero inoxidable AISI 316L. El mecanizado se lleva a cabo con herramientas de metal duro (WC-Co) con distintas geometrías de desgaste de flanco (0mm, 0.05mm, 0.4mm y 0.8mm). La pieza gira dando lugar al movimiento de corte y la herramienta se desplaza dando lugar a los movimientos de avance y profundidad. El proceso se realiza en seco, y en condiciones ambiente de 20°C.

Los parámetros de corte son los siguientes:

PARÁMETROS DE CORTE	
Velocidad de corte [m/min]	120
Avance [mm/rev]	0.1
Profundidad de pasada [mm]	2

Tabla 5.1: Parámetros de corte.

Para que la simulación sea factible es necesario reducir y simplificar el problema.

Inicialmente se acota el dominio del análisis, reduciéndolo a un pequeño volumen de la pieza, cuyo tamaño es el menor posible que permita la estabilización de las

diferentes variables, tales como fuerzas de mecanizado, temperaturas, etc. Este proceso de simplificación se esquematiza a continuación:



Figura 5.3: Esquema del proceso de reducción del dominio para la aplicación del modelo numérico.

Por último, dado que el corte es ortogonal, y considerando condiciones de deformación plana, se simplifica el modelo tridimensional al modelo bidimensional con el que finalmente trabajará con el programa. Éste se muestra a continuación:

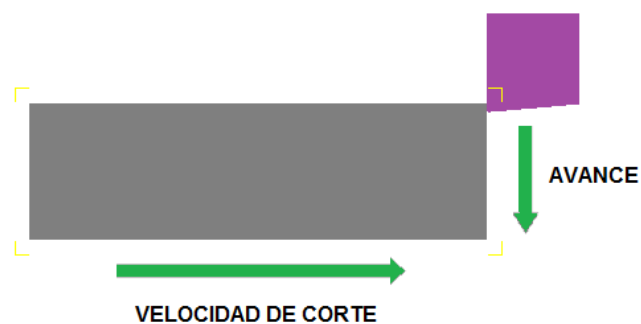


Figura 5.4: Simplificación bidimensional del modelo.

5.2. DEFINICIÓN DE LA PIEZA.

5.2.1. Geometría.

La geometría de la pieza se define como un rectángulo de dimensiones 5mm de largo x 1.5 mm de alto, correspondientes a la dirección de corte y de avance respectivamente.

Con estas dimensiones se asegura que las condiciones de contorno impuestas a la pieza no afectarán dicha zona. Además, tras la simulación se comprueba que se trata de una longitud suficiente para la estabilización de las fuerzas y del resto de variables que nos interesan.

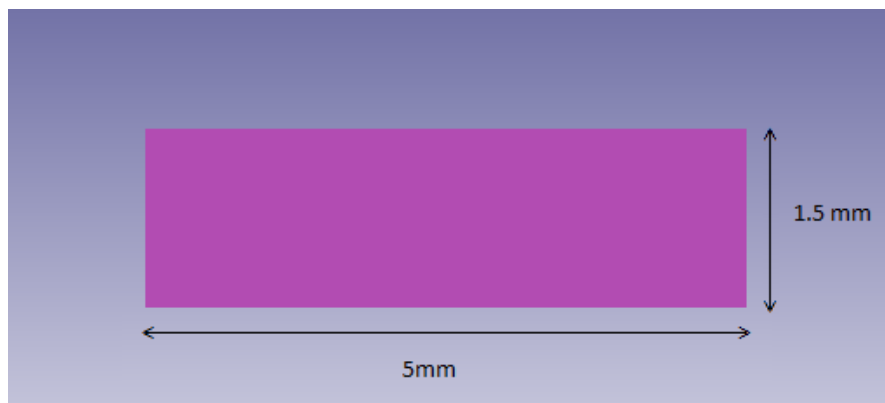


Figura 5.5: Medidas de la pieza.

5.2.2. Material.

DEFORM2D permite realizar simulaciones considerando que el material de la pieza presenta bien un comportamiento elastoplástico o bien exclusivamente plástico. En

esta simulación se ha considerado como elastoplástico, ya que, a pesar de que se requiere un mayor tiempo de cálculo, simulando este comportamiento se tiene en cuenta la recuperación elástica del material y las deformaciones debidas a la expansión térmica, necesario para el cálculo de tensiones residuales.

El material utilizado para la pieza es el acero inoxidable AISI 316L, que se encuentra en la librería de DEFORM. Las propiedades de este material se muestran a continuación:

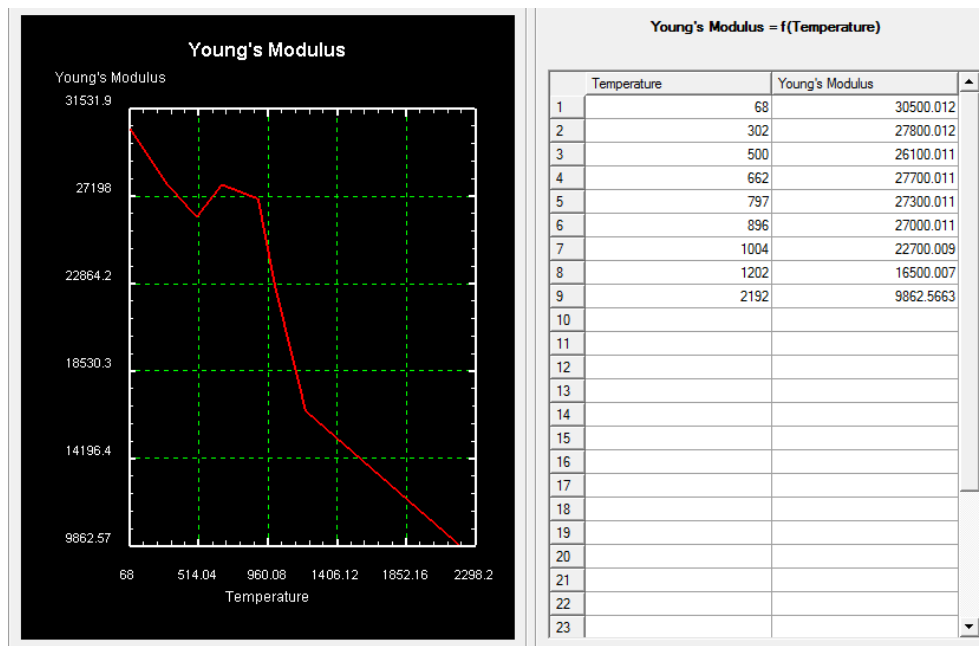


Figura 5.6: Módulo de Young en función de la temperatura (°C).

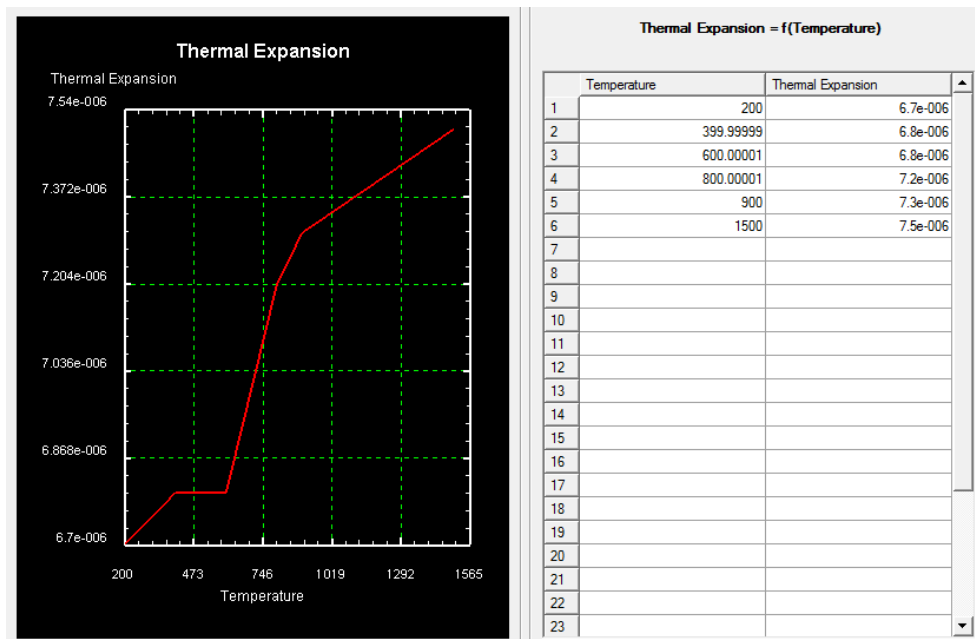


Figura 5.7: Expansión térmica ($\text{mm/mm}^\circ\text{C}$) en función de la temperatura ($^\circ\text{C}$).

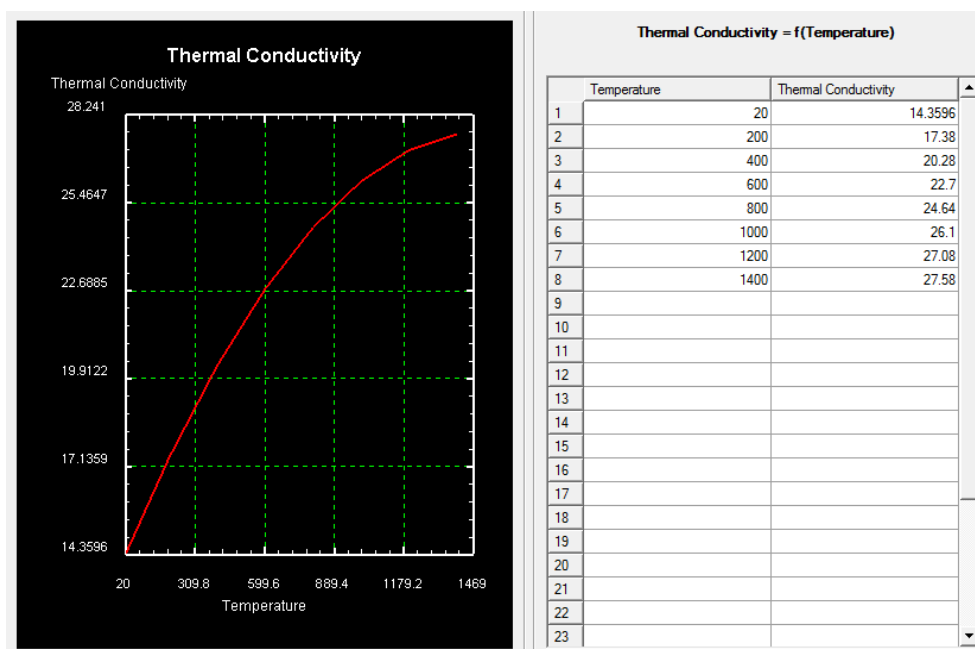


Figura 5.8: Conductividad térmica ($\text{N/s}^\circ\text{C}$) en función de la temperatura ($^\circ\text{C}$).

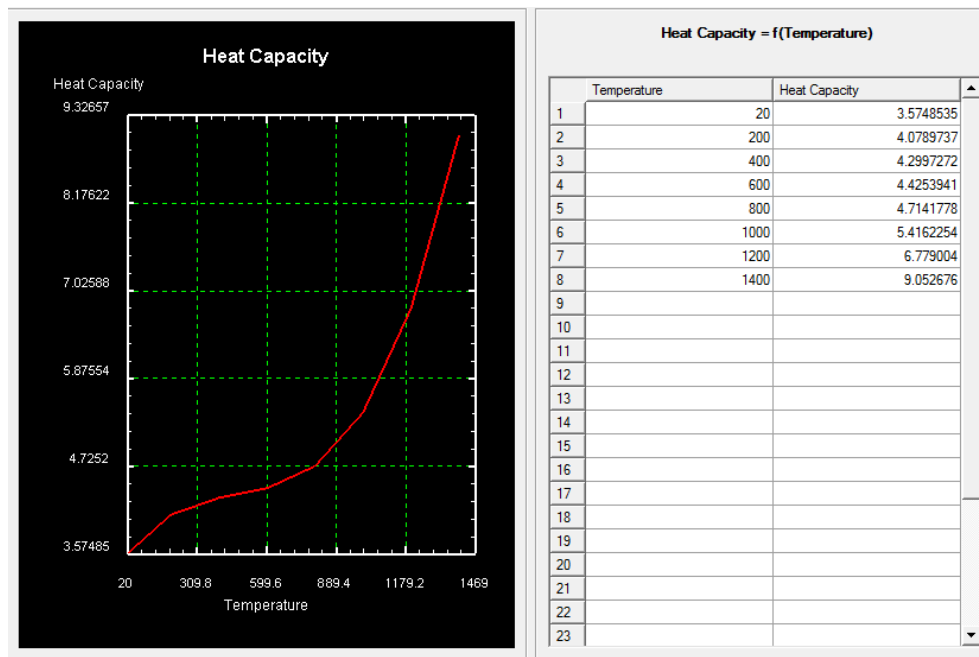


Figura 5.9: Definición del calor específico (N/mm²/°C): en función de la temperatura (°C).

El coeficiente de Poisson es constante de valor 0.3, al igual que la emisividad, que toma un valor de 0.7.

5.2.3. Mallado.

A la hora de generar el mallado de la pieza se debe tener en cuenta que aumentar el número de elementos de la misma aumenta de manera general la exactitud de los resultados pero incrementa notablemente el tiempo de simulación. Por esta razón es necesario llegar a un compromiso entre estas dos variables para la generación de la malla óptima.

Para optimizar la densidad de mallado se realiza un análisis de sensibilidad, es decir, pruebas con diferentes mallados para encontrar el tamaño de elemento máximo a partir del cual los resultados de la simulación no varían. Además, para no incrementar innecesariamente el tiempo de simulación, se concentrará el mallado en las zona de interés, quedando el resto con una malla más basta. Esta concentración de elementos se consigue gracias al sistema de ventanas de mallado proporcionado por DEFORM 2D, que nos permite delimitar distintas zonas con diferentes densidades de mallado, definiendo para cada una un tamaño relativo de elemento.

Dado todo lo anterior, en el mallado de la pieza se establecen tres zonas, delimitadas por tres ventanas de mallado.

- Zona 1: Corresponde a la zona de corte. Es la zona en la que existirán mayores gradientes de temperatura así como de tensiones y deformaciones. Es por ello que será la parte cuya malla sea crítica y de mayor densidad. Los elementos tendrán un tamaño de 5 μm aproximadamente, valor obtenido a través de los análisis de sensibilidad, que indican que a partir de este tamaño los resultados no van a variar apreciablemente.
- Zona 2: Esta zona corresponde a la superficie que ya ha sido mecanizada. Interesa que la densidad de la malla en esta ventana sea alta también debido a que nos va a permitir la medida de tensiones residuales y temperaturas en la superficie mecanizada. Sin embargo, no se trata de una zona de gradientes tan elevados como la anterior, por lo que el tamaño de los elementos será superior. Así, la ventana de mallado en esta zona tendrá una profundidad de 0.1 mm aproximadamente y el tamaño de los elementos en la misma será de 10 μm .
- Zona 3: Es el resto de la pieza, en la que los cambios de propiedades serán muy suaves y en la que no nos interesa medir ninguna variable. Por esta razón se genera

aquí una malla poco densa cuyos elementos poseen un tamaño de 50 μm aproximadamente.

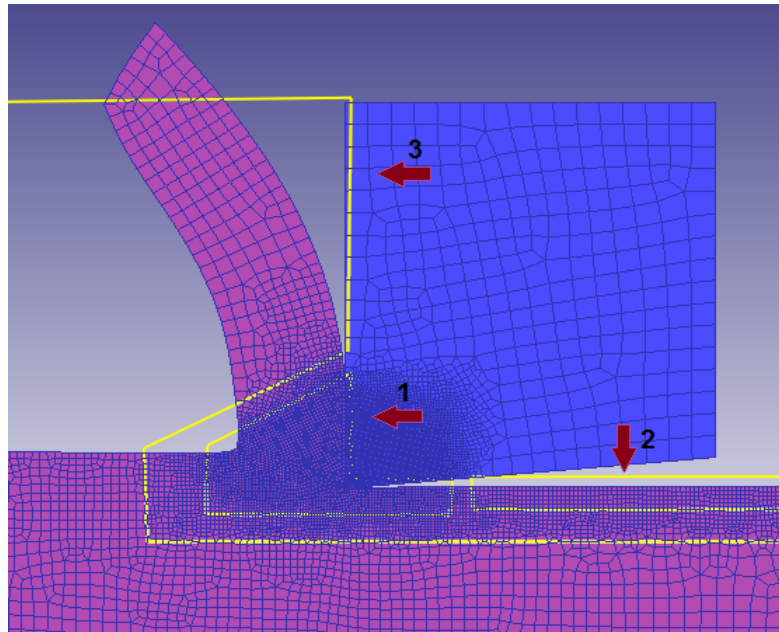


Figura 5.10: Ventanas utilizadas para el mallado de la pieza en la primera pasada.

Para satisfacer las densidades apropiadas en cada zona de la pieza se ha necesitado utilizar 8000 elementos para el mallado total de la pieza al comienzo de la simulación. Como, según avanzaba la formación de viruta, la longitud de la superficie mecanizada ha ido aumentando, también ha sido necesario aumentar el número de elementos a lo largo de la simulación, llegando al final de esta a tener una malla de 12000 elementos.

5.2.4. Condiciones de contorno.

Como se ha indicado en la parte introductoria de este capítulo, para la simulación se considera que es la pieza la que realiza el movimiento de corte.

Por esta razón se establecen unas condiciones que generen un movimiento a velocidad de corte (120 m/min) en el eje X y que impidan el movimiento en el eje Y. Para no entorpecer el mecanismo de formación de viruta es tas condiciones se han aplicado a los laterales y la pared inferior de la pieza, como se muestra en la siguiente figura:

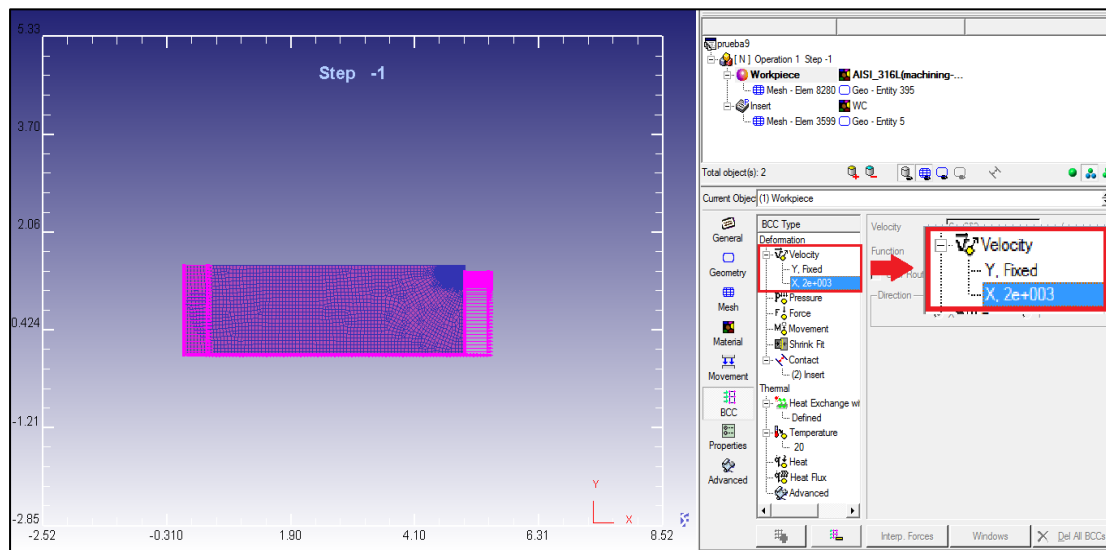


Figura 5.11: Condiciones de contorno de velocidad aplicadas a la pieza.

5.3. DEFINICIÓN DE LA HERRAMIENTA.

5.3.1. Geometría.

Se definen 4 geometrías de herramienta correspondientes a los distintos niveles de desgaste simulados: herramienta sin desgaste y herramientas con desgaste de flanco de 0.05mm, 0.4mm y 0.8mm.

Es importante recordar que la geometría con desgaste de flanco 0.05 mm corresponde a la geometría de acomodación de filo, que en la Tesis, como se ha justificado previamente, es la geometría que considera como herramienta no desgastada.

Para todas las geometrías se ha definido una herramienta de dimensiones 1mmx1mm, ángulo de desprendimiento 0°, ángulo de incidencia 5° y radio de punta 0.02mm.

En la siguiente página se muestran las distintas geometrías generadas:

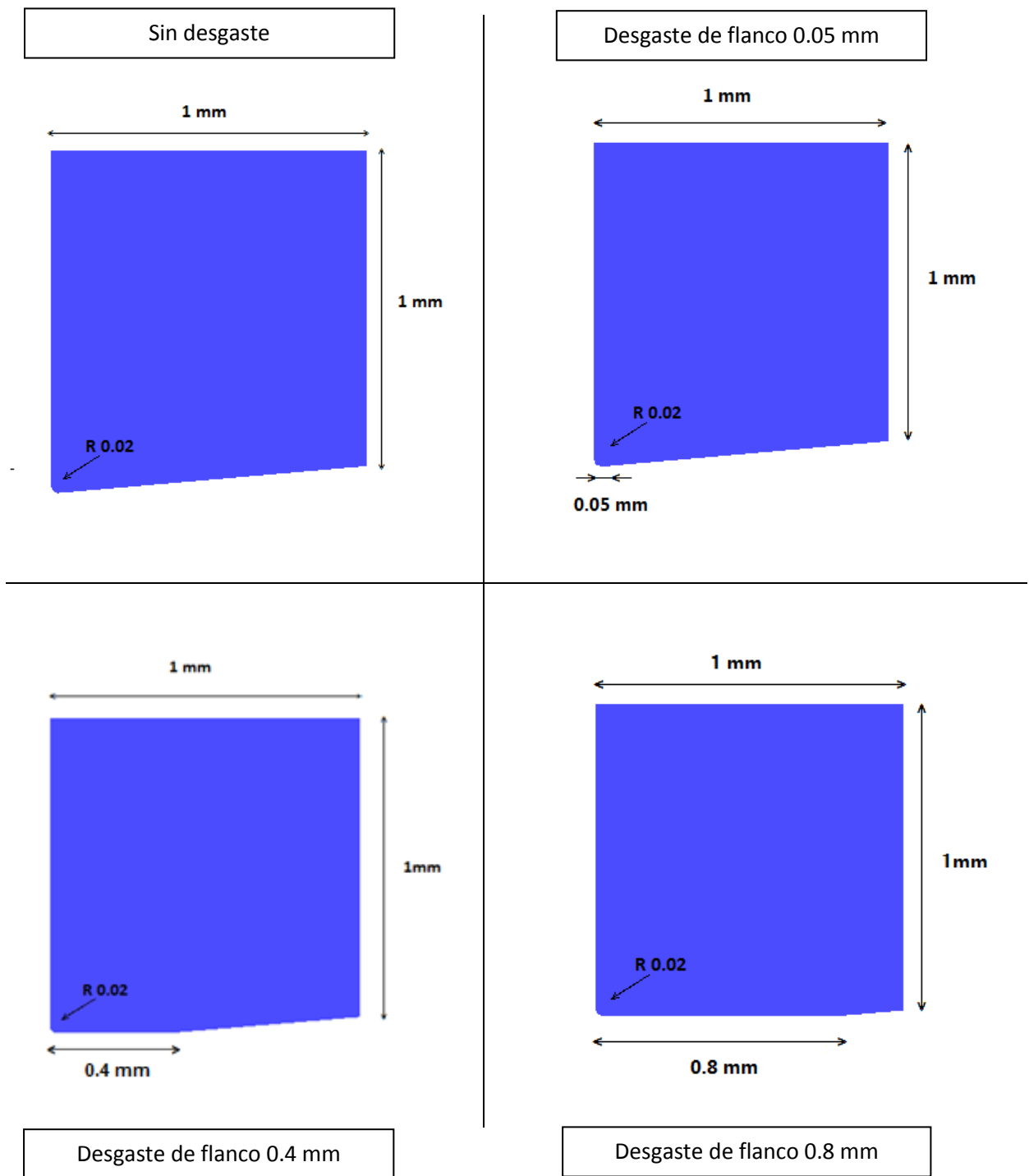


Figura 5.12: Geometrías de la herramienta sin desgaste, y con desgaste de flanco de 0.05, 0.4 y 0.8 mm.

5.3.2. Material.

La herramienta en estas simulaciones se ha definido como rígida, opción recomendada para este tipo de elementos ya que no van a sufrir grandes deformaciones. Definirla de esta manera supone una pérdida de exactitud prácticamente despreciable y disminuye mucho el número de ecuaciones a resolver en cada iteración y por tanto el tiempo de cálculo.

El material utilizado para la herramienta es el carburo de wolframio (WC-Co), presente en la librería del propio DEFORM. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

PROPIEDADES WC-Co	
Módulo de Young [Mpa]	650000
Coefficiente de Poisson	0.25
Coefficiente de expansión térmica [mm/mm°C]	5,00E-006
Conductividad térmica [N/s/°C]	59
Calor específico [N/mm2/°C]	15
Emisividad	0

Tabla 5.2: Propiedades del Carburo de Wolframio utilizado.

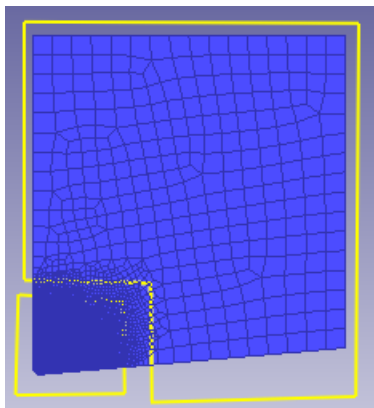
5.3.3. Mallado.

Se utiliza también un sistema de ventanas para este mallado. Gracias a ellas es posible asegurar una malla con un tamaño de elemento de 5 micras en la zona de corte, esto es, del mismo tamaño que se había establecido para la pieza en la misma zona.

El número de elementos utilizados es constante en cada caso debido a que se ha definido la herramienta como un cuerpo rígido, lo que implica que no sufrirá deformaciones durante la simulación y por tanto su malla tampoco lo hará. Además se ha ido aumentando según ha ido aumentando el desgaste de flanco, por considerarse importante cubrir completamente esta zona de contacto.

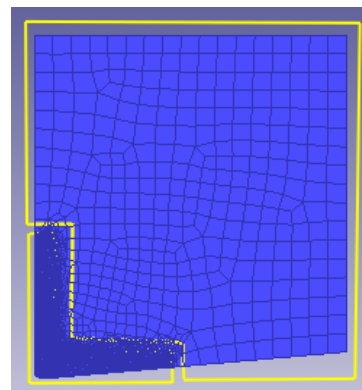
A continuación se muestran los sistemas de ventanas y el número de elementos utilizados:

Sin desgaste.



Número de elementos: 3500

Desgaste de flanco 0.05 mm.



Número de elementos: 3500

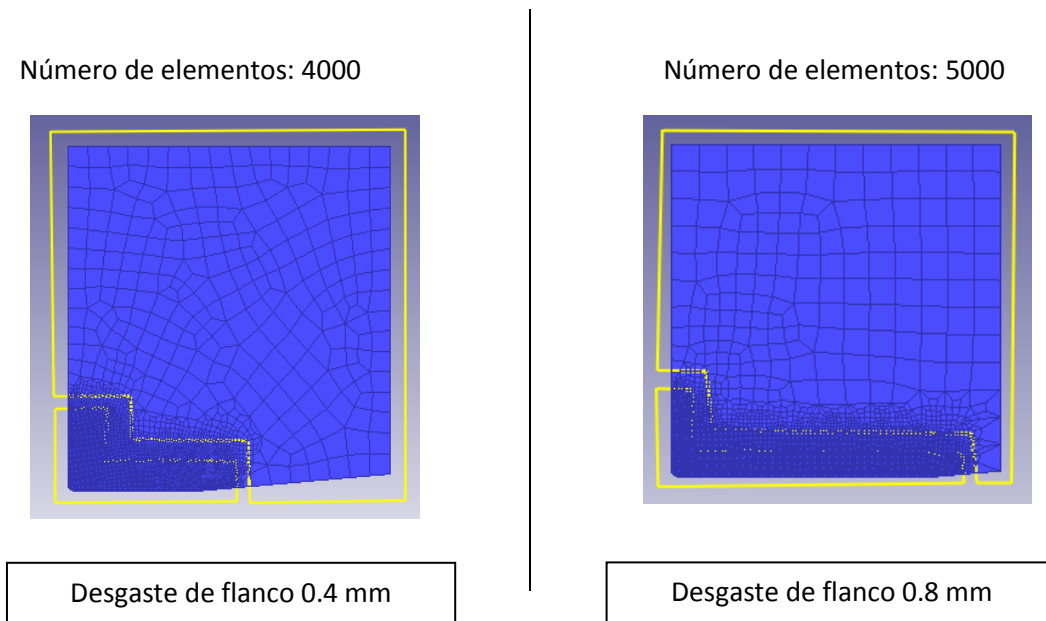


Figura 5.13: Mallado de la herramienta sin desgaste y con desgaste de flanco de 0.05, 0.4 y 0.8 mm.

5.3.4. Condiciones de contorno.

Como se ha supuesto que la herramienta permanece quieta mientras es la pieza la que avanza durante la simulación, se restringirán sus movimientos en los ejes X e Y. Por tanto se impondrán condiciones de velocidad nula en la dirección de ambos ejes en los nodos correspondientes a los laterales de la herramienta opuestos al filo. En este caso, al ser un elemento rígido, no es necesario aplicar esta condición a la totalidad de los nodos.

La aplicación de estas condiciones se muestra en la siguiente figura:

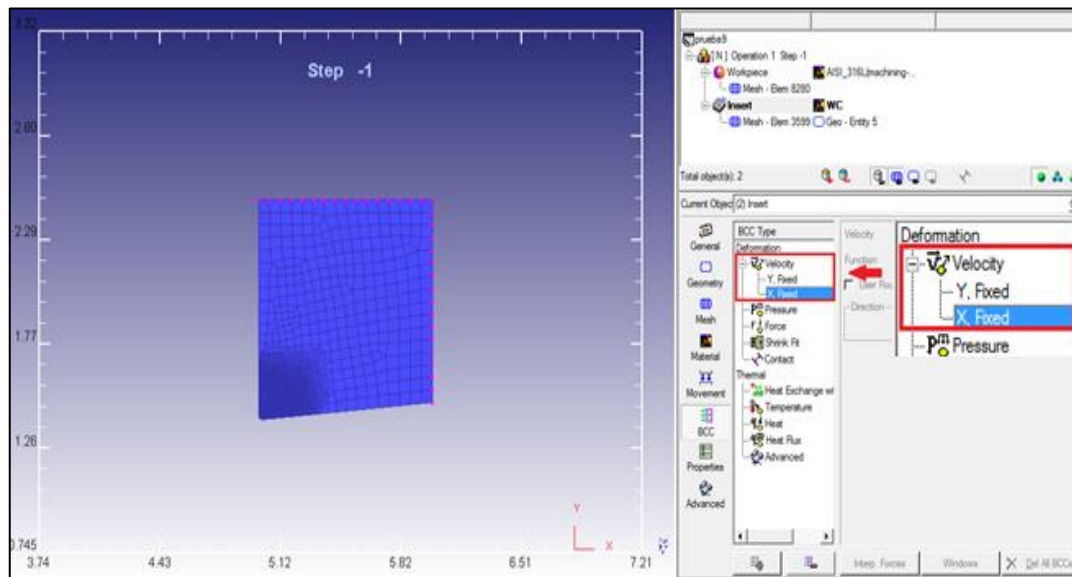


Figura 5.14: Condiciones de contorno de velocidad aplicadas a la herramienta.

5.4. CONDICIONES DE FRICCIÓN.

Para la modelización de la fricción en este proyecto, se consideran dos zonas de contacto:

- Zona de contacto viruta-herramienta.
- Zona de contacto herramienta-superficie mecanizada.

En ambas se considera un comportamiento de tipo Coulomb, con un coeficiente de rozamiento de valor $\mu = 0.8$ en la primera zona y de valor $\mu = 0.4$ en la segunda. Para su definición se ha utilizado también un sistema de ventanas y a continuación se muestra un ejemplo:

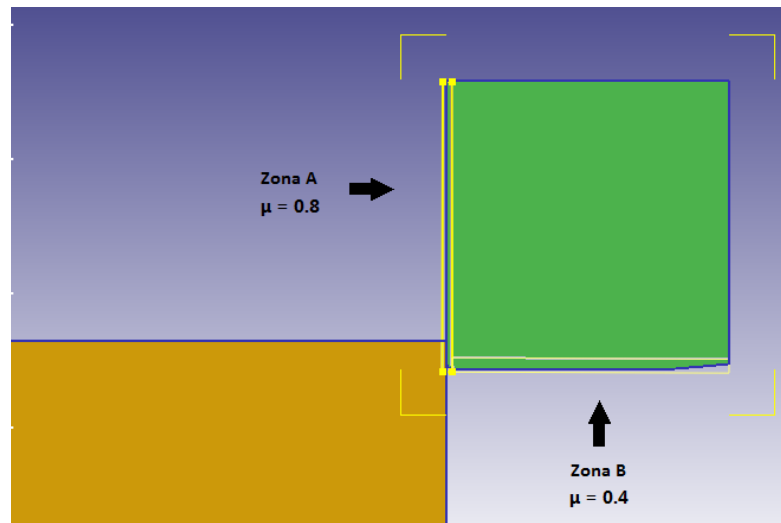


Figura 5.15: Ventanas de fricción empleadas.

Una vez avanzada la simulación, y cuando ya se ha desarrollado la viruta, las zonas que entran en contacto son las que se muestran a continuación. El sistema de ventanas se ha definido a lo largo de toda la longitud de la herramienta para asegurarnos de que no queda ninguna zona de contacto sin definir correctamente.

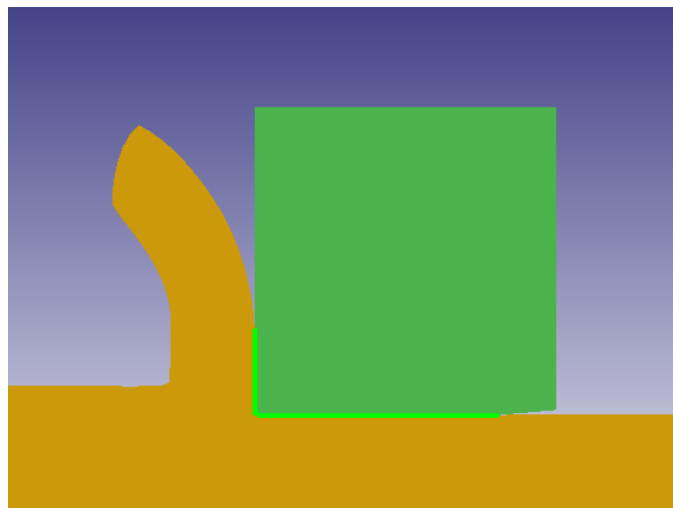


Figura 5.16: Zona de contacto real.

La utilización de un coeficiente de Coulomb de 0.8 en el contacto viruta-superficie de desprendimiento, representa uno de los cambios más significativos respecto a la Tesis, que utiliza un modelo híbrido variable para el mismo. La razón de considerar este coeficiente es que constituye una importante simplificación del modelo, y, para las condiciones de corte que se simulan en este proyecto, en la Tesis se asume como válido, presentando los siguientes resultados:

Condiciones de Corte		Leyes de Contacto - Fuerza de Corte (F_c)						
		HV	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,8$	$m = 0,3$	$m = 0,5$	$m = 0,8$
V_c (m/min)	a (mm/rev.)	F_c (%)	F_c (%)	F_c (%)	F_c (%)	F_c (%)	F_c (%)	F_c (%)
120	0,1	-2	2	-5	-4	14	8	-4
120	0,05	2	8	-3	-4	18	12	4
240	0,1	-8	-7	-11	-8	10	2	-10
240	0,05	6	9	2	3	30	17	8
Error Medio =		5	7	5	5	18	10	6

Tabla 5.3: Media de errores en porcentaje (%) de la fuerza de corte (F_c) con las leyes de contacto estudiadas.

Condiciones de Corte		Leyes de Contacto - Fuerza de Avance (F_a)						
		HV	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,8$	$m = 0,3$	$m = 0,5$	$m = 0,8$
V_c (m/min)	a (mm/rev.)	F_a (%)	F_a (%)	F_a (%)	F_a (%)	F_a (%)	F_a (%)	F_a (%)
120	0,1	16	22	5	8	44	33	16
120	0,05	15	21	13	11	31	26	14
240	0,1	10	11	6	11	40	27	9
240	0,05	-2	4	-12	-8	22	14	-2
Error Medio =		11	15	9	10	34	25	10

Tabla 5.4: Media de errores en porcentaje (%) de la fuerza de avance (F_a) con las leyes de contacto estudiadas.



5.5. CONDICIONES DE SIMULACIÓN.

En la primera pasada se simulará el corte para toda la longitud de la pieza, de forma que se pueda disponer de una longitud de 2,5 mm para mecanizar en la segunda pasada, libre de errores introducidos por el efecto borde.

Se recomienda que los pasos en los que se realice la simulación sean de un tamaño comprendido entre un tercio y un medio del tamaño del menor de los elementos de malla. Como los elementos más finos utilizados en estas simulaciones son de 5 micras, los pasos establecidos para esta simulación son de 2 micras de longitud.

Esto se impone en el programa a través de dos opciones:

- El número total de pasos, que es el resultado de la relación entre la longitud total y la longitud de paso. En nuestro caso, como la longitud total es de 5 mm y el tamaño de paso se ha establecido en 2 micras, el número de pasos impuesto será de 2500.
- El tiempo por paso, resultando de la relación entre la velocidad de corte (o movimiento de la pieza en el eje X) y la longitud de paso. Así, si nuestra velocidad de corte es de 120 m/min o 2000 mm/s y el avance por paso de 2 micras, el tiempo por paso será 1e-006 segundos.

Además, a efectos de análisis en el postprocesado se imponen que el programa guarde los datos cada 10 pasos.

En cuanto a las opciones de iteración, se utilizará skyline solver, que es una solución de matriz invertida básica y el método de iteraciones Newton-Raphson recomendado para la mayoría de los problemas por su buena convergencia en pocas iteraciones. Los valores de convergencia de velocidad y fuerza se fijan en 0.01mm/s y 0.1 N respectivamente.

En las opciones de simulación, por último, también se establece el valor de la temperatura ambiente (20°C en este caso) y el del coeficiente de película (en nuestro caso $0.08 \text{ N}/(\text{s}.\text{mm}.^{\circ}\text{C})$), que corresponde a ensayos al aire con convección forzada).

Como se ha mencionado, DEFORM 2D es un software que permite el remallado automático durante la simulación. Este remallado se realiza cuando, debido a las deformaciones progresivas de los elementos, éstos alcanzan ángulos en los nodos demasiado agudos, pudiendo afectar a la convergencia y por tanto a los resultados de la simulación. El programa también remalla de manera automática cuando se supera el límite de interferencia entre los elementos de la pieza y la herramienta, impuestos en las condiciones de simulación. Este valor se aconseja que sea aproximadamente un tercio del tamaño del menor de los elementos de la malla, por lo que en este proyecto se estableció en 1.67 micras.

Por último, cabe mencionar, que durante la simulación además del remallado automático realizado por el software, es necesario remallar de manera manual cuando el programa no es capaz de solventar los problemas de convergencia o singularidad de manera automática. Así durante el transcurso de la simulación, el programa parará innumerables veces, en las que, entrando de nuevo en el módulo preprocesador, habrá que modificar alguna de las variables relativas al mallado y volver a mallar. Así mismo, es necesario ir controlando durante todo el proceso que el mallado sigue conservando el tamaño de elemento que nos interesa de forma que, cuando esto no suceda, habrá que remallar y aumenta el número de elementos totales.

Finalmente, tras horas de simulación, y continuos remallados, automáticos o manuales, el movimiento de corte se completa y se puede proceder a la obtención de resultados y al análisis de las diferentes variables que nos interesan a través del módulo de postprocesado. Esto se mostrará y discutirá en el siguiente capítulo.

5.6. DEFINICIÓN DE LA SEGUNDA PASADA.

En este proyecto, se realizarán dos pasadas para cada simulación. En estas segundas pasadas los parámetros de corte serán exactamente los mismos que en las primeras, esto es $V_c=120$ m/min, $a=0.1$ mm/rev y $p=2$ mm.

En la realidad, y para comprenderlo de manera intuitiva, se podría decir que la pieza está girando dando lugar al movimiento de corte, mientras que la herramienta permanece quieta durante cada revolución, realizando un movimiento de avance entre revolución y revolución.

Como se está simulando qué ocurre en una parte muy pequeña de la pieza, en términos de simulación esto se traduce en, una vez realizada la primera pasada, la necesidad de esperar el tiempo correspondiente a una revolución, cuyo efecto es un enfriamiento de la misma.

Por ello, para poder establecer las condiciones requeridas para simular la segunda pasada para cada uno de los casos analizados, será necesario generar una simulación intermedia entre ésta y la primera. Esta simulación intermedia se empleará para reposicionar la pieza frente a la herramienta, y para simular el enfriamiento de la pieza entre las dos pasadas.

En el modelo de la segunda pasada se mantienen las condiciones de corte respecto a la primera, así como las condiciones de fricción, las propiedades de los materiales y la geometría y mallado de la herramienta. Se modifica en cambio, el mallado de la pieza, al que se le añaden nuevas ventanas para asegurar que se mantiene un mallado fino (10μ) en la zona previamente mecanizada en la primera pasada, como se muestra a continuación:

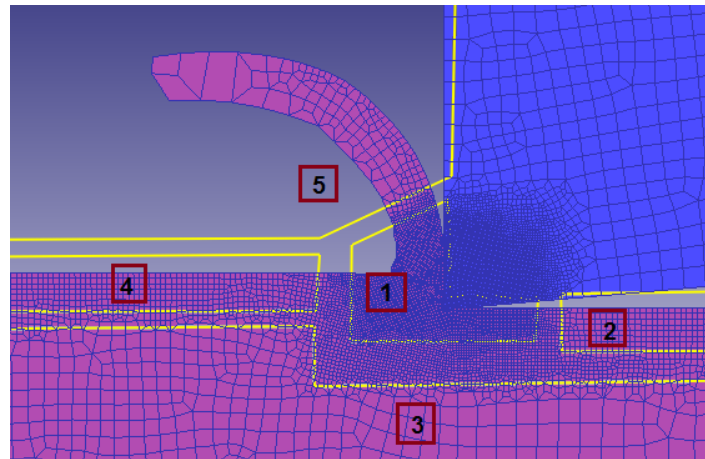


Figura 5.17: Ventanas de mallado utilizadas en la segunda pasada.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Tras la finalización de las simulaciones se procede a la obtención y análisis de resultados a través de diferentes opciones presentes en el módulo de postprocesado del DEFORM 2D.

Como se ha indicado en el capítulo 3, las simulaciones numéricas de procesos de mecanizado mediante modelos de elementos finitos, nos permiten obtener valores de magnitudes cuya determinación experimental, o no es posible, o supone un coste muy elevado.

Así, en este proyecto, además de las fuerzas de mecanizado, se analizarán las magnitudes de la geometría de la viruta generada así como las distribuciones y valores máximos de la presión normal y temperaturas generadas en cada caso.

A continuación se especifican las magnitudes medidas y analizadas:

1. Geometría de viruta: Espesor de viruta, ángulo de cizalladura y longitud de contacto viruta-herramienta.
2. Componentes de la fuerza de mecanizado (fuerza de corte y fuerza de avance) y relación entre ambas.
3. Presión normal sobre la herramienta, tanto en la zona de desprendimiento como en la de incidencia.
4. Temperaturas máximas en la viruta y en la superficie mecanizada.

6.1. GEOMETRÍA DE LA VIRUTA.

La geometría de la viruta viene definida principalmente por tres magnitudes relacionadas entre sí:

- Espesor.
- Ángulo de cizalladura.
- Longitud de contacto con la herramienta.

6.1.1. Espesor

El espesor de la viruta se mide sobre la interfaz gráfica de los resultados, a la que se accede a través del postprocesador. Se realizan varias mediciones, cuando se considera que la viruta está totalmente desarrollada, y se calcula una media de las mismas, para eliminar errores de medición.

Un ejemplo de una de las medidas se muestra a continuación:

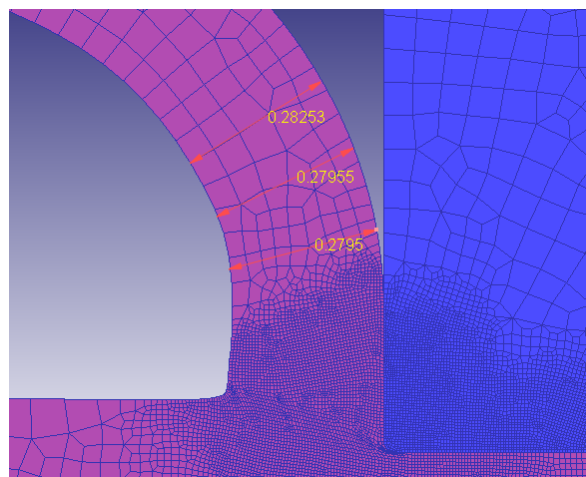


Figura 6.1: Ejemplo de la medida del espesor sobre la viruta formada.

Los resultados obtenidos para todos los niveles de desgaste, tanto para la primera pasada como la segunda se muestran a continuación en la siguiente tabla:

ESPESOR [mm]	DESGASTE			
PASADA	0	0.05 mm	0.4 mm	0.8 mm
1	0,299	0,272	0,278	0,273
2	0,153	0,144	0,138	0,137

Tabla 6.1: Espesor de viruta.

Además se muestran en la siguiente gráfica para facilitar la comparación entre ellas:

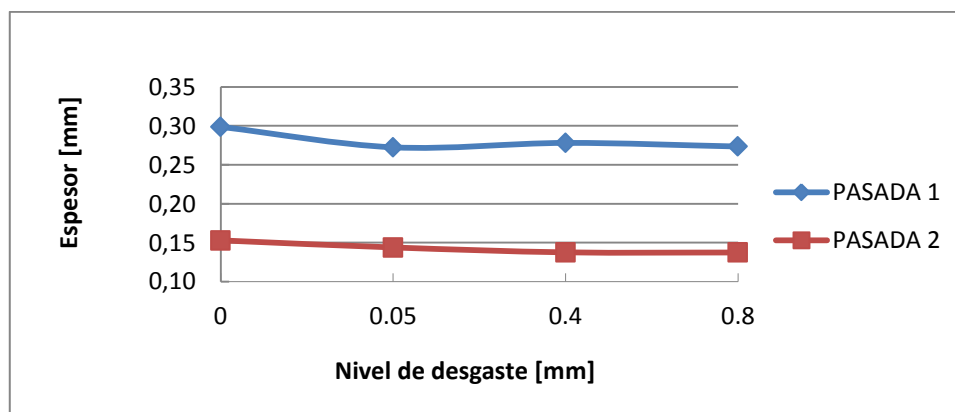


Figura 6.2: Espesor de viruta en función del nivel de desgaste.

Se observa poca variación entre los resultados para los distintos niveles de desgaste de flanco. En la primera pasada la máxima variación se da con la introducción de la acomodación de filo (flanco 0.05 mm) respecto a la herramienta sin desgaste, con un valor de un 8%, mientras que la variación de los resultados entre los distintos niveles de flanco es menor del 2%.

En la segunda pasada la máxima variación es debida otra vez a la introducción de la acomodación de filo, con un valor de 6% respecto al valor obtenido con la herramienta sin desgaste. La variación que se produce con el flanco de 0.4mm con respecto al de 0.05mm es de casi el 5% y la que introduce el flanco de 0.8 mm respecto al de 4mm es de menos del 0.15%

Al comparar los valores obtenidos en ambas pasadas para cada desgaste de flanco se puede observar que los resultados para la segunda pasada, son muy inferiores a los de la primera pasada. Estas diferencias consisten en una disminución cercana al 50% en los cuatro casos.

Por otro lado, se comparan los valores con los obtenidos en el modelo numérico de la Tesis. Los valores que se dan en la Tesis son para la herramienta con acomodación de filo y desgaste 0.8mm en la primera pasada. La diferencia con los mismos son de un 24 y un 21% respectivamente.

6.1.2. Ángulo de cizalladura.

El ángulo de cizalladura se calculará a partir de los valores ya obtenidos para el espesor de la viruta. Se utilizará la siguiente expresión que relaciona estas magnitudes:

$$\phi = \arctg \left(\frac{r \cdot \cos \gamma}{1 - r \cdot \sin \gamma} \right)$$

, donde ϕ es el ángulo de cizalladura, γ el ángulo de desprendimiento y r la relación de corte, definida por h/h' , es decir por la relación entre el espesor teórico (coincidente con el avance en el corte ortogonal) y el espesor real (calculado en el apartado anterior).

En todos los casos el valor del ángulo de desprendimiento es 0° y el valor del espesor teórico es el valor del avance, 0.1mm/rev. Utilizando los valores del espesor calculados anteriormente para cada caso, se obtienen los siguientes valores del ángulo de cizalladura:

ÁNGULO DE CIZALLADURA [$^\circ$]	DESGASTE			
PASADA	0	0.05 mm	0.4 mm	0.8 mm
1	18,51	20,16	19,78	20,09
2	33,17	34,79	36,00	36,04

Tabla 6.2: Ángulo de cizalladura.

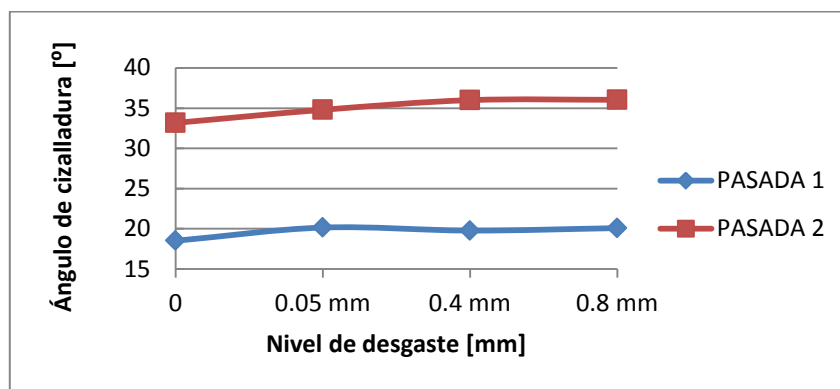


Figura 6.3: Ángulo de cizalladura en función del nivel de desgaste.

El ángulo de cizalladura y el espesor son magnitudes inversamente proporcionales, como muestra la fórmula de cálculo. Por ello se pueden observar variaciones del mismo orden que las obtenidas para el espesor entre las distintas geometrías de herramienta. En la primera pasada las variaciones máximas son cercanas al 8% para

la introducción de la acomodación de filo e inferiores al 2% para los desgastes de 0.4 y 0.8 mm.

En la segunda pasada las variaciones entre el desgaste de 0.05 y la herramienta sin desgaste son prácticamente del 5%, del 3.5% las variaciones entre los resultados obtenidos para desgaste 0.4mm y 0.05 mm y menores al 0.12% entre la herramienta con desgaste 0.8mm y la de 0.4mm.

Como resultado de la comparación entre los valores obtenidos para la segunda pasada respecto a la primera se concluye que los valores obtenidos para el ángulo de cizalladura son muy superiores, llegando a incrementos del 82% en caso del desgaste de 0.4mm, 79% para la herramienta sin desgaste y la de 0.8mm y 73% para el desgaste de 0.05 mm.

Se comparan los valores con los obtenidos de la Tesis para los mismos casos que en el espesor: herramienta con desgaste 0.05 mm y 0.8 mm. Se observa un decremento del 17 y el 15 % respectivamente.

6.1.3. Longitud de contacto.

La longitud de contacto se mide, al igual que el espesor, directamente sobre los resultados gráficos mostrados por el postprocesador. La medida se realiza cuando el punto de pérdida de contacto entre viruta y herramienta se estabiliza, y se establece entre dicho punto y la tangente a la superficie mecanizada en la dirección del movimiento de corte. Esto se esquematiza en la siguiente figura:



Figura 6.4: Esquema de la medida de la longitud de contacto.

Los valores obtenidos para todos los niveles de desgaste en la primera y segunda pasada se muestran a continuación:

LONGITUD DE CONTACTO [mm]	DESGASTE			
PASADA	0	0.05 mm	0.4 mm	0.8 mm
1	0,280	0,282	0,283	0,286
2	0,165	0,150	0,145	0,149

Tabla 6.3: Longitud de contacto.

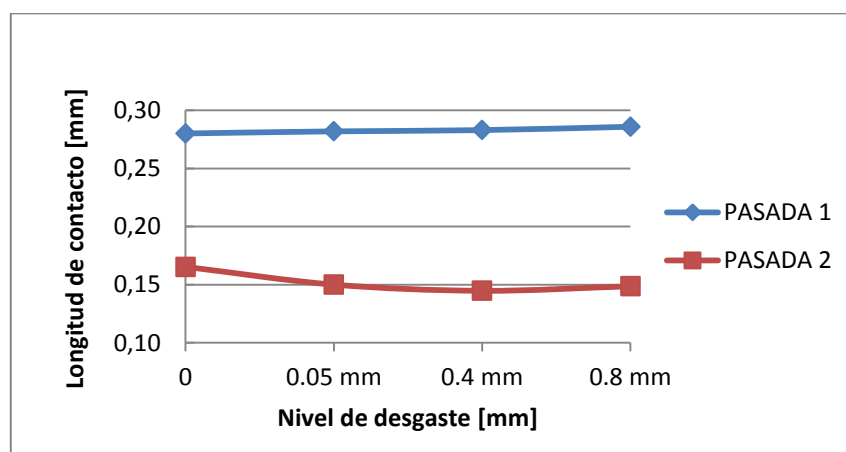


Figura 6.5: Longitud de contacto en función del nivel de desgaste.

Las variaciones entre los resultados obtenidos para la primera pasada entre las diferentes geometrías de herramienta son insignificantes, todos ellos menores del 2%.

En cambio en la segunda pasada estas medidas no son tan homogéneas, aunque sí lo suficientemente pequeñas para seguir considerando despreciable la variabilidad de los datos. La máxima diferencia se observa en la introducción de la acomodación del filo, tomando un valor cercano al 9%.

Las diferencias observadas entre los valores obtenidos para sendas pasadas son parecidas a las ya observadas para las medidas del espesor. Los valores para la longitud de contacto son un 41% inferiores para la herramienta sin desgaste, 45% para la herramienta con acomodación de filo y del 48% para las herramientas con desgaste 0.4 y 0.8mm.

Por último se comparan los valores con los obtenidos en la Tesis (herramienta con desgaste 0.05 mm y 0.8 en la primera pasada) , observando un aumento del 22 y 16% respectivamente respecto a los mismos.

6.2. FUERZAS DE MECANIZADO.

Las fuerzas de mecanizado, junto con las tensiones residuales, son las magnitudes que se midieron experimentalmente en los ensayos de corte realizados en el marco de la Tesis de la profesora Marín. Sus valores se utilizaron para ajustar el modelo numérico en la Tesis para la geometría de herramienta no desgastada y para comprobar la validez del modelo en las otras geometrías.

A diferencia del modelo desarrollado en la Tesis [\[1\]](#), el modelo descrito en este Proyecto Fin de Carrera no ha sido ajustado en base a ningún valor experimental. Es por tanto razonable esperar diferencias significativas entre los resultados numéricos y

experimentales, que podrían reducirse con un ajuste adecuado de determinados parámetros del modelo.

Se analizarán tres magnitudes: Fuerza de corte, fuerza de avance y ratio entre ambas.

La evolución del valor de las fuerzas de corte y avance con el movimiento de corte es un resultado obtenido directamente a través del postprocesador.

En general se puede observar que las fuerzas de corte estabilizan más rápidamente que las fuerzas de avance.

Además, la introducción del desgaste de flanco en la geometría de la herramienta provoca dos efectos:

- Al entrar en contacto con la superficie mecanizada la zona final del flanco de la herramienta se produce un incremento brusco del valor de la fuerza de corte y un retraso importante de la estabilización de la fuerza de avance, que estabiliza a un valor muy superior al esperado.
- Aumenta la oscilación de los valores alrededor del valor medio.

Ambos efectos se pueden observar en las figuras 6.8 y 6.9, en las que se muestra la evolución de las fuerzas para la geometría de desgaste de flanco de 0.8 mm en la primera pasada. Se muestran la evolución de las fuerzas para la herramienta sin desgaste, figuras 6.6 y 6.7 para ilustrar el mejor el efecto provocado.

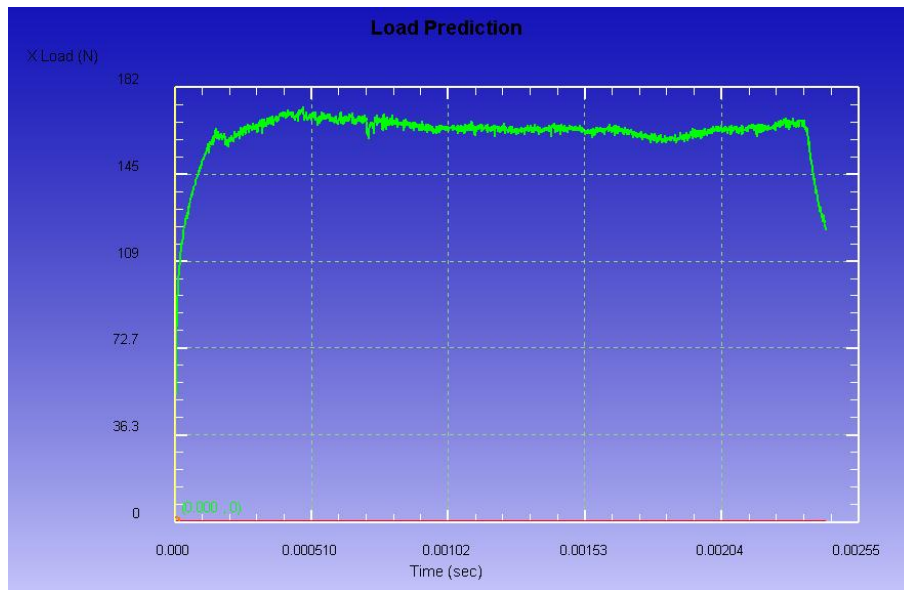


Figura 6.6: Fuerza de corte, en función del tiempo, para la primera pasada con herramienta sin desgaste.

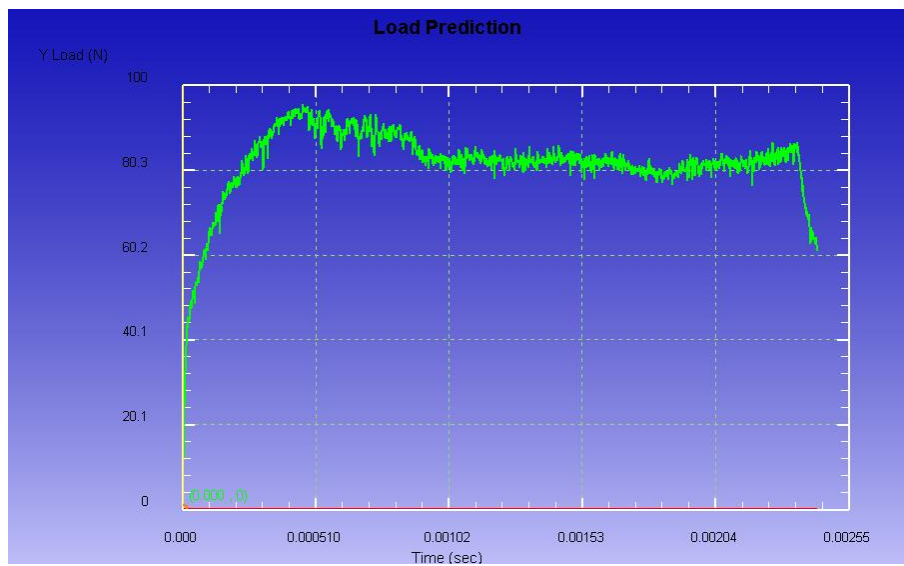


Figura 6.7: Fuerza de avance, en función del tiempo, para la primera pasada con herramienta sin desgaste.

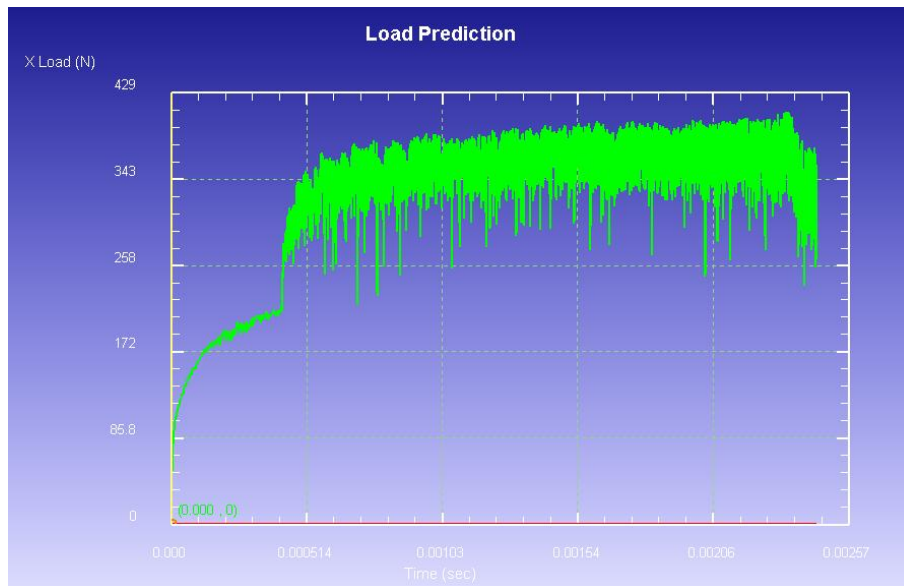


Figura 6.8: Fuerza de corte, en función del tiempo, para la primera pasada con la herramienta con desgaste de flanco de 0.8 mm.

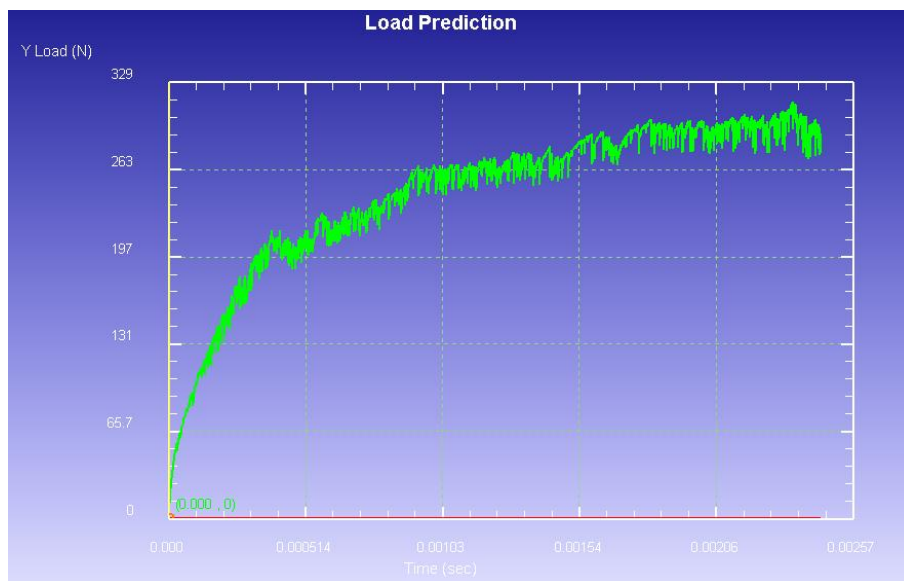


Figura 6.9: Fuerza de avance, en función del tiempo, para la primera pasada con la herramienta con desgaste de flanco de 0.8 mm.

Se podría decir, por tanto, que el punto en el que el flanco dejar de hacer contacto con la superficie mecanizada constituye una singularidad, que provoca incrementos bruscos en las fuerzas (así como en otras variables, como se verá más adelante). Esta singularidad podría deberse a problemas del modelo numérico para simular el efecto de la arista que presenta la geometría de la herramienta al final del flanco.

Por esta razón se han realizado dos simulaciones adicionales en las que se ha eliminado la arista viva formada por la superficie de flanco e incidencia incluyendo un radio de acuerdo de 0.02 mm y 0.1mm entre ellas. Los resultados arrojan una disminución de los fenómenos observados: disminuye la variación brusca que se da en la fuerza de corte y la fuerza de avance estabiliza antes. Estas mejoras son mucho más apreciables para el radio 0.1mm que para el de 0.02mm, por lo que se considera un aumento de dicho radio puede constituir la clave para evitar de forma definitiva estos efectos.

En la segunda pasada, si bien los valores observados son inferiores, la evolución de las fuerzas mantiene un comportamiento prácticamente similar: La fuerza de corte estabiliza antes que la de avance, retrasando la introducción de desgaste de flanco un retraso en dicha estabilización. En cambio, se observa una menor introducción de ruido en los valores que en la primera pasada al aumentar el flanco.

A partir de los valores que generan las gráficas anteriormente mostradas, y las del resto de simulaciones, se calculan los valores medios de las fuerzas de corte y de avance para todos los casos. Además, se calcula la relación entre la fuerza de corte y la fuerza de avance (F_c/F_a).

A continuación se muestra una tabla que recoge los valores medios obtenidos para todos los niveles de desgaste, tanto para la primera, como para la segunda pasada:

FUERZAS DE MECANIZADO	1 PASADA			2 PASADA		
SIMULACIÓN	Fc [N]	Fa [N]	Fa/Fc	Fc [N]	Fa [N]	Fa/Fc
DESGASTE 0	320	160	0,50	270	145	0,54
DESGASTE 0.05	320	170	0,53	270	148	0,55
DESGASTE 0.4	384	328	0,85	296	234	0,79
DESGASTE 0.8	440	410	0,93	444	454	1,02

Tabla 6.4: Fuerzas de corte, avance y ratio obtenidas en la primera y segunda pasada.

Se han reflejado estos valores en las siguientes gráficas, para facilitar su comparación:

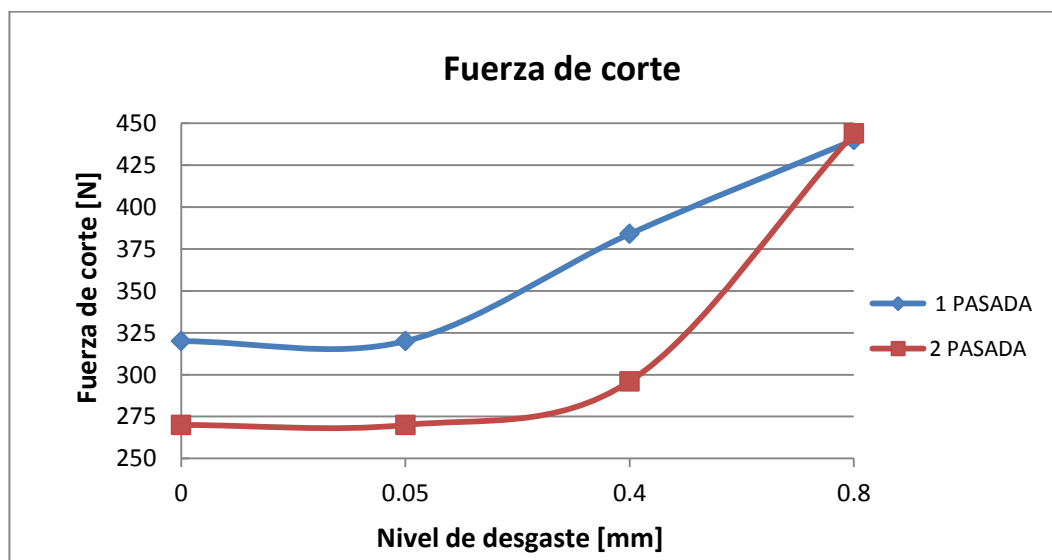


Figura 6.10: Fuerza de corte en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas

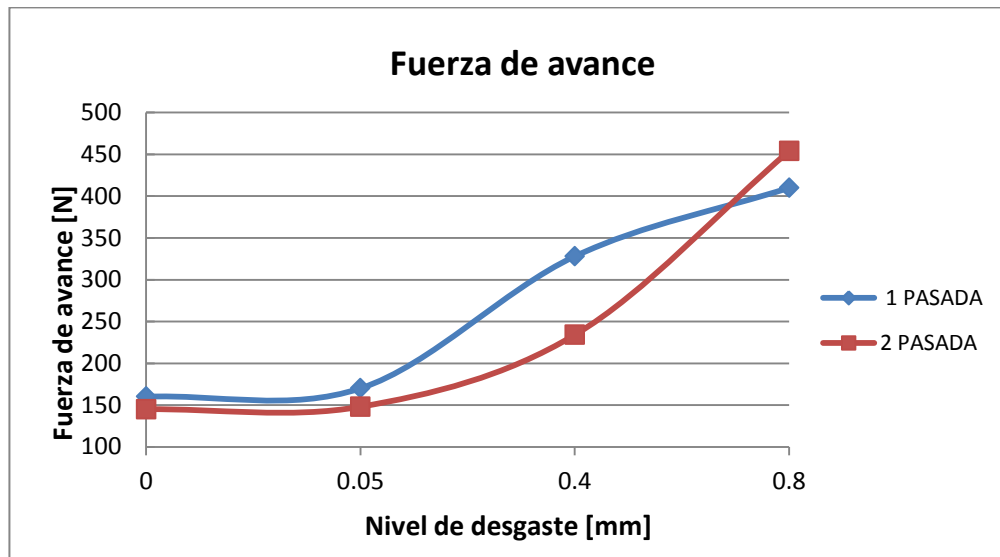


Figura 6.11: Fuerza de avance en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas

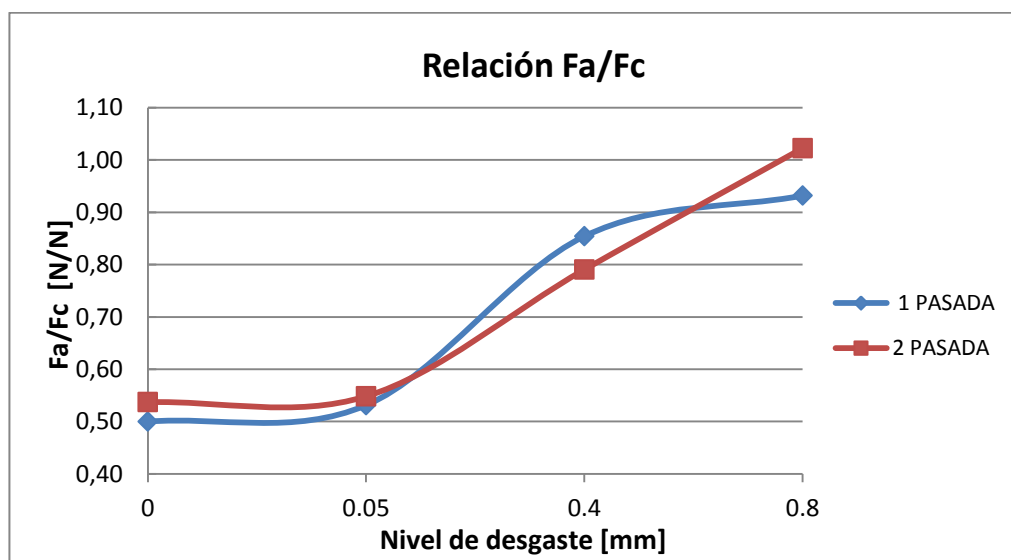


Figura 6.12: Relación F_a/F_c en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas

A la vista de estos resultados se podría decir que:

- Las fuerzas de mecanizado aumentan de forma clara con el nivel de desgaste tanto en la primera como en la segunda pasada.
- Este aumento es más acusado en la fuerza de avance que en la fuerza de corte.
- Este aumento es más acusado en general en la segunda pasada que en la primera.

Así, en la primera pasada el aumento de la fuerza de corte es del 20 % para el desgaste de 0.4 mm y 37% para el desgaste de 0.8mm, ambas con respecto a la herramienta sin desgaste o a la de desgaste 0.05mm, pues los resultados en ambas para la fuerza de corte coinciden en este caso. Las variaciones con respecto a los resultados para la herramienta sin desgaste de la fuerza de avance toman valores del 6% superiores para la herramienta con desgaste 0.05 mm y 105% y 156 % para las herramientas de 0.4mm y 0.8 mm respectivamente.

En la segunda pasada la fuerza de corte obtenida para la herramienta con acomodación de filo tampoco presenta variación con respecto a la herramienta sin desgaste, y las variaciones como consecuencia de la introducción del flanco de 0.4mm y 0.8mm son del 10% y del 60% respectivamente. En la fuerza de avance se obtienen incrementos del 2% para el desgaste de 0.05mm, del 62% para el desgaste de 0.4mm y 215% para el de 0.8mm.

Comparando los resultados de ambas pasadas entre sí para cada nivel de desgaste, se observa que los valores obtenidos en la segunda pasada, tanto para la fuerza de corte como para la fuerza de avance, son inferiores a los obtenidos en la primera en tres casos: herramienta sin desgaste, desgaste 0.05 mm y desgaste 0.4mm. En el caso del desgaste de 0.8mm los valores en la segunda pasada para las dos componentes de la fuerza superan ligeramente a los de la primera (esto es coherente con el alto crecimiento que experimentan los valores para este desgaste en la segunda pasada). Así los valores de la fuerza de corte sufren decrementos en la segunda pasada con respecto a la primera del 16% para las herramientas sin desgaste y con acomodación

de filo, del 23% para el desgaste de 0.4 mm y un incremento del 1% para el desgaste de 0.8 mm. Para la fuerza de avance los valores descienden un 9% en el caso de la herramienta sin desgaste, 13% para desgaste 0.05 mm y 29% para desgaste 0.4 mm, mientras en para el caso de desgaste de flanco 0.8 el valor aumenta un 11%.

Además es interesante comparar los resultados de ambas pasadas con los resultados obtenidos tanto en el modelo numérico de la Tesis como experimentalmente. A continuación se muestran las tablas para las componentes de la fuerza en la que se han incluido los cuatro casos a comparar:

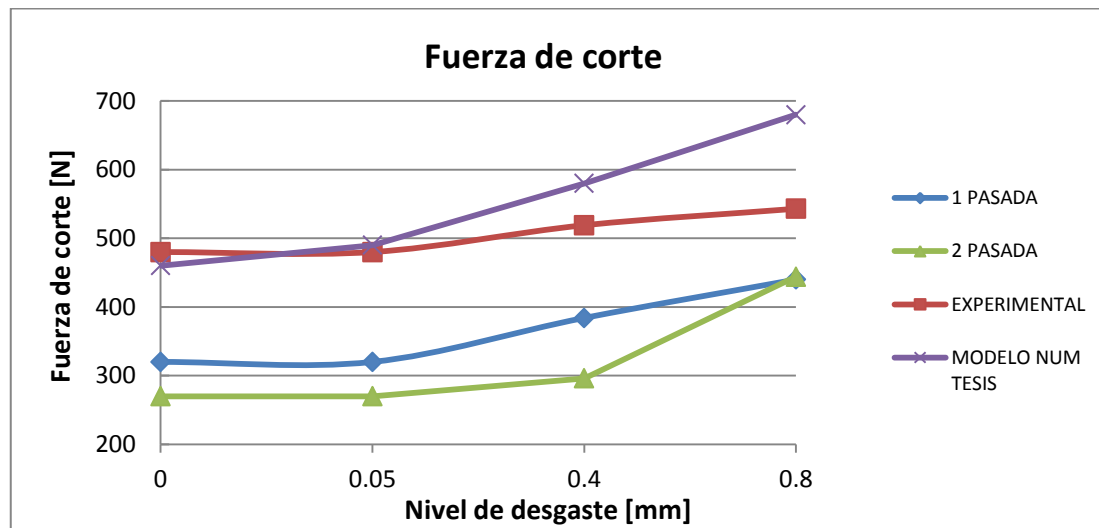


Figura 6.13: Fuerza de corte en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.

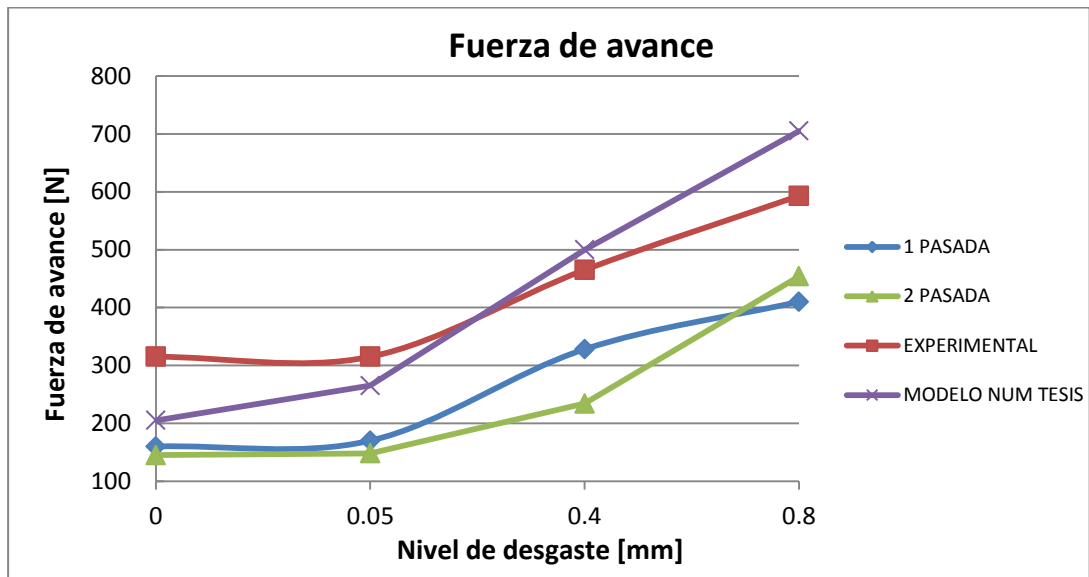


Figura 6.14: Fuerza de avance en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.

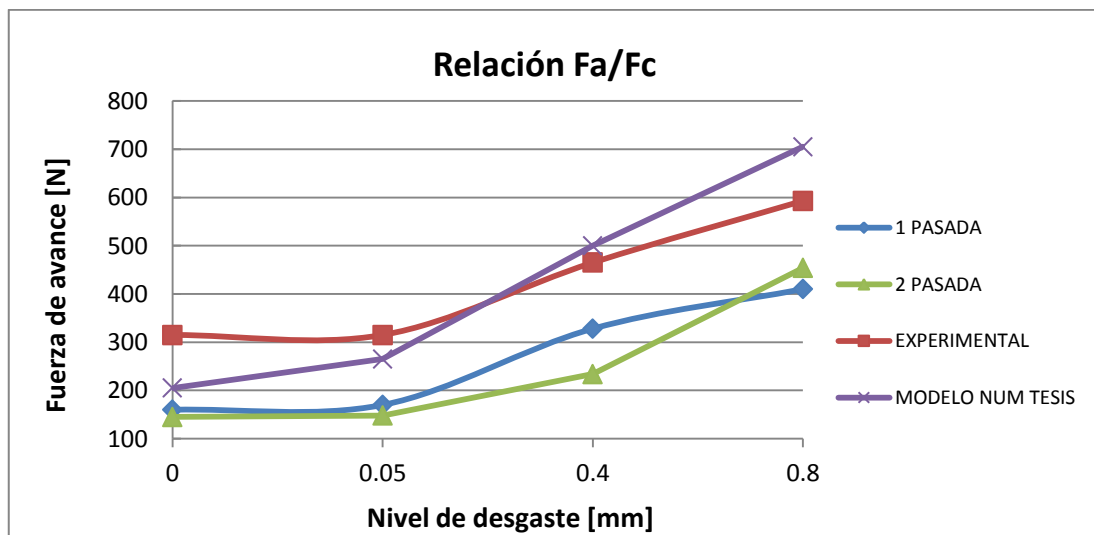


Figura 6.15: Relación F_a/F_c en función del nivel de desgaste, para sendas pasadas y para los datos experimentales y numéricos de la Tesis.

Se puede afirmar que:

- Los valores obtenidos para la herramienta sin desgaste con este modelo son significativamente inferiores a los obtenidos de manera experimental, siendo esta diferencia un poco superior en el caso de la fuerza de avance. Esta diferencia también se da para el modelo numérico de la Tesis, pero en menor cuantía, ya que este modelo sí ha sido previamente ajustado experimentalmente, y el de este proyecto no.
- Los valores de las fuerzas obtenidos a partir del modelo numérico de este proyecto experimentan un crecimiento ligeramente más acusado con el aumento del nivel de desgaste de flanco que el observado experimentalmente. Este efecto es más apreciable en la fuerza de avance.
- Los valores del modelo numérico de la Tesis también experimentan un mayor crecimiento con el desgaste de flanco que los resultados experimentales pero mucho más acusados en general, sobre todo para la fuerza de avance.
- Por tanto, aunque los valores iniciales del modelo numérico de la Tesis estén más próximos a los experimentales, ya que el modelo numérico ha sido previamente ajustado, se considera que los valores aportados por este proyecto mejoran la tendencia de los datos frente a los experimentales, sobre todo para la fuerza de avance y la relación F_a/F_c . Así, la variación de fuerza de avance observada con la introducción de flanco 0.8 mm frente a la herramienta sin desgaste es de 278 N para los resultados experimentales y de 250 y 309N para los resultados alcanzados en el modelo de este proyecto en la 1 y 2 pasada respectivamente, frente a los 500 N observados en el modelo numérico de la Tesis. En cuanto a la relación F_a/F_c la variación del valor de la misma con la introducción del flanco 0.8 mm en los resultados experimentales es de 0,43, exactamente la misma observada para el modelo numérico de este proyecto en la primera pasada, mientras que para la segunda pasada la variación observada es de 0,49. En el modelo numérico de la Tesis

esta variación asciende a 0,59. Por último las variaciones introducidas en la fuerza de corte por el flanco 0.8 mm son de 63 N en los resultados experimentales, 120N y 174N en la primera y segunda pasada respectivamente de este modelo y 220 en el modelo numérico de la Tesis.

6.3. PRESIÓN NORMAL.

La medida de esta variable es de gran importancia cuando se utilizan herramientas con desgaste de flanco. La presión normal existirá allá donde pieza y herramienta estén en contacto, diferenciándose por tanto dos zonas: contacto herramienta-viruta, y contacto herramienta-zona mecanizada. Esta última superficie de contacto aumenta según aumenta el desgaste de flanco, incrementándose con ello las fuerzas de empuje.

Debido a que se está utilizando un radio de acuerdo de 0.02 mm, la zona de contacto por debajo del filo deja de ser un punto para convertirse en una superficie. Esta superficie se ha considerado como parte de la zona secundaria, por considerar que su comportamiento es semejante al de la misma y además el error inducido con esta asunción es despreciable.

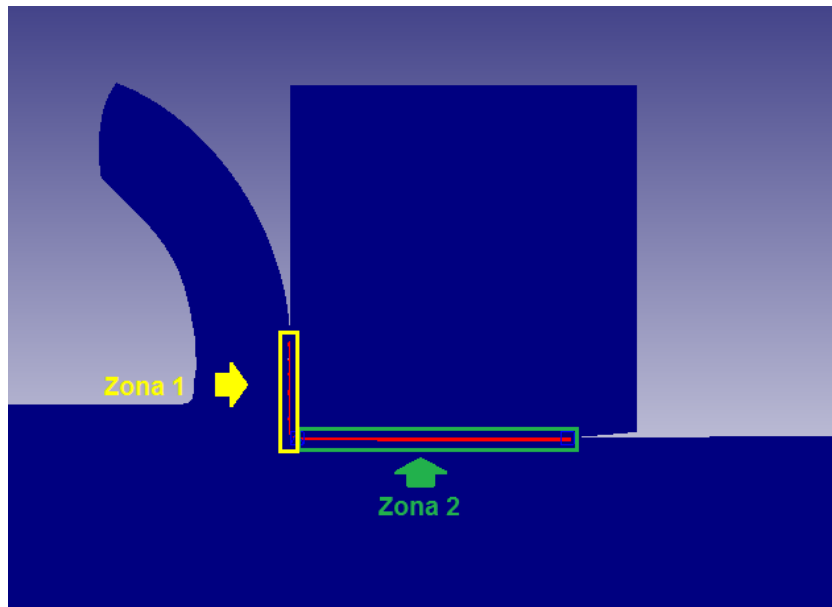


Figura 6.16: Zonas de contacto consideradas.

Zona de contacto viruta-herramienta (1):

La distribución de la presión normal en esta zona es muy similar para las cuatro geometrías de herramienta; se trata de una distribución muy homogénea. A continuación se muestra un ejemplo de la distribución de presión en esta zona para el caso de la herramienta sin desgaste en la primera pasada:

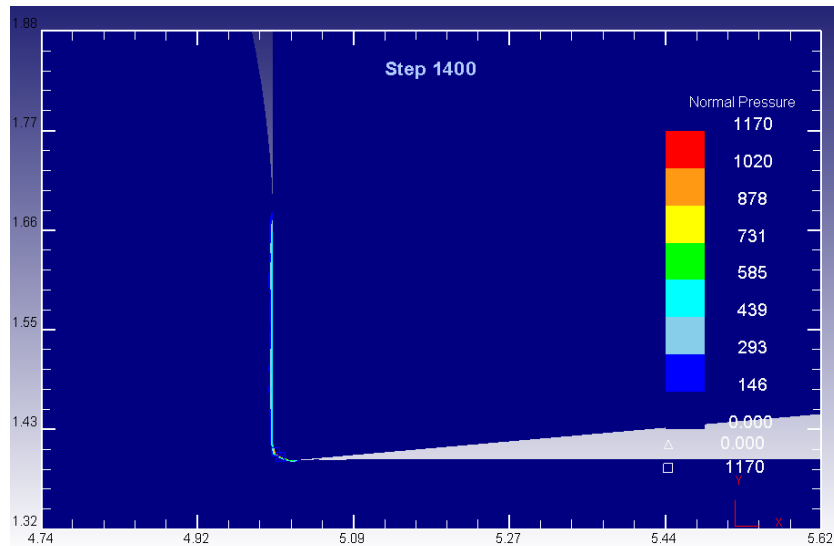


Figura 6.17: Distribución de la presión normal en la zona secundaria para la herramienta sin desgaste en la primera pasada

Se han calculado los valores medios de la presión normal en estas zonas. Dichos valores, se muestran a continuación para cada caso y para ambas pasadas:

PRESIÓN NORMAL MEDIA [N/mm ²]	DESGASTE			
PASADA	0	0.5 mm	0.4 mm	0.8 mm
1	564,83	573,48	541,6	553,77
2	716,2	729,22	731,81	705,19

Tabla 6.5: Presión normal en la zona secundaria de corte.

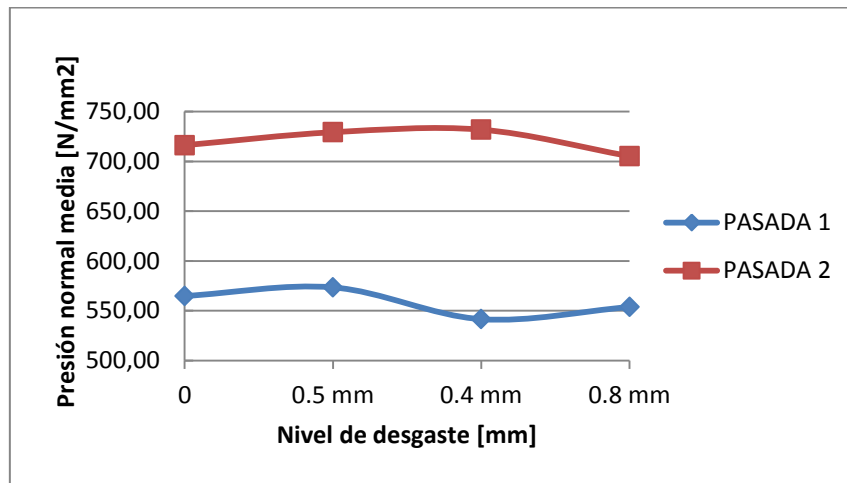


Figura 6.18: Presión normal en la zona secundaria de corte en función del nivel de desgaste.

Se observan valores muy similares entre sí, con unas diferencias inferiores al 6% en la primera pasada y al 4% en la segunda, por lo que podría concluirse que la existencia de flanco no influye en la presión normal generada en la zona de contacto viruta-herramienta.

Por otro lado, los valores registrados en la segunda pasada son superiores a los registrados en la primera. Las variaciones son del 28% para los casos de herramienta sin desgaste, desgaste 0.05 mm y desgaste 0.8 mm, y del 35% en el caso de la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm.

Zona de contacto pieza-superficie mecanizada (2):

En la zona de contacto pieza-superficie mecanizada el comportamiento es similar entre las distintas geometrías. En todos los casos el máximo se da en la zona de contacto cercana al filo, y allí donde existe flanco, en la zona de pérdida de contacto de dicho flanco. A continuación se muestran las distribuciones obtenidas para todas las geometrías de herramienta en la primera pasada:

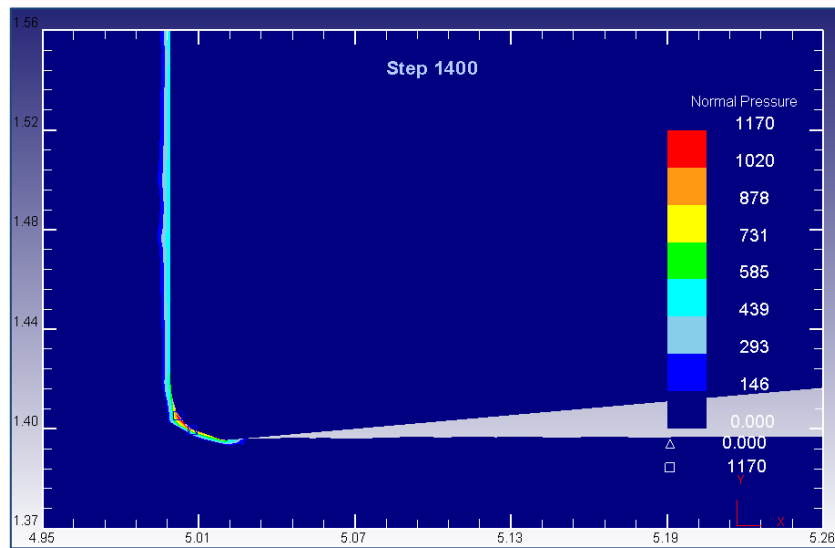


Figura 6.19: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta sin desgaste en la primera pasada.

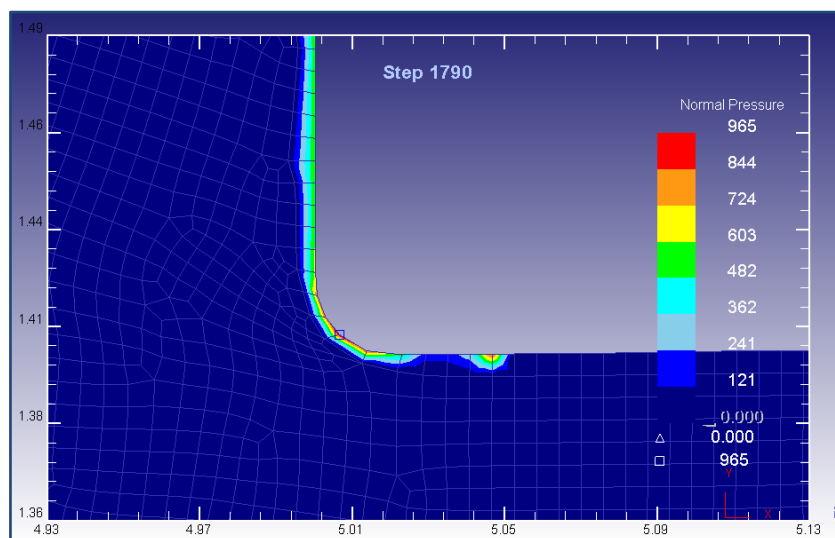


Figura 6.20: Detalle de la distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 mm en la primera pasada.

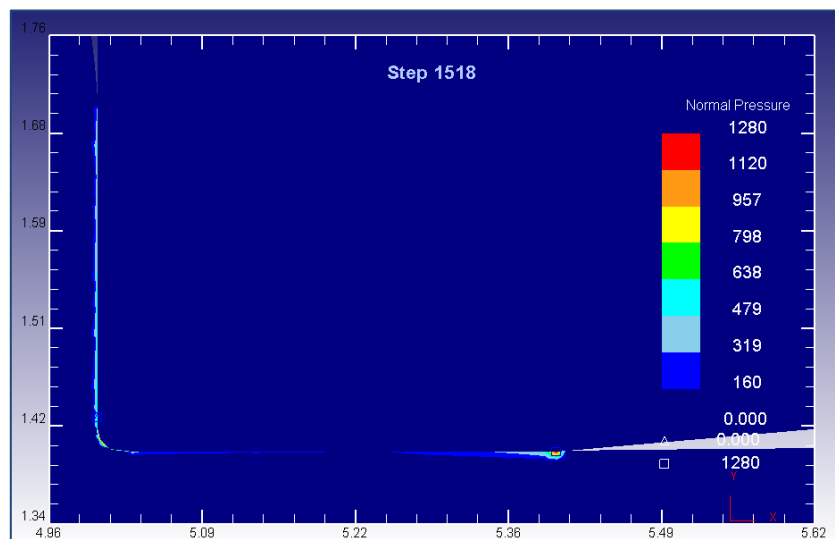


Figura 6.21: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm en la primera pasada.

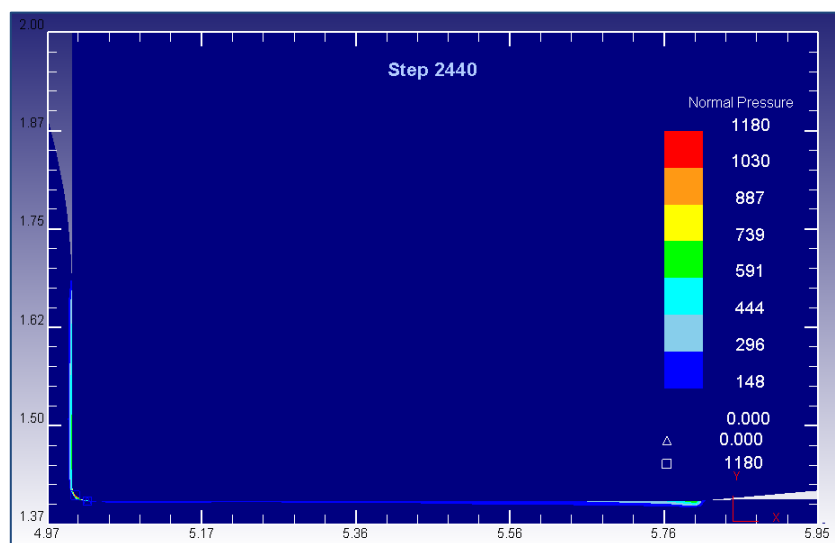


Figura 6.22: Distribución de la presión normal en la zona terciaria para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm en la primera pasada.

A la vista de estos resultados se puede establecer que:

- La existencia del flanco aumenta el área de existencia de presión normal.
- La presión normal máxima no varía apreciablemente con el nivel de desgaste.
- Los valores máximos aumentan sustancialmente con la segunda pasada

Esta variación de la presión normal con el desgaste de flanco es muy importante en el estudio de este tipo de geometrías, ya que explica el aumento de las fuerzas de empuje y con ello el elevado crecimiento de la fuerza de avance con el aumento del nivel de desgaste.

Hay que destacar, como ya se puede intuir en las imágenes mostradas, que existe un crecimiento muy elevado de la presión en los puntos en los que el flanco deja de hacer contacto, tanto en la primera como en la segunda pasada. Para poder apreciarlo, se muestran a continuación la evolución de la presión con la distancia al filo para las geometrías con desgaste de 0.4 y 0.8 mm en la primera pasada:

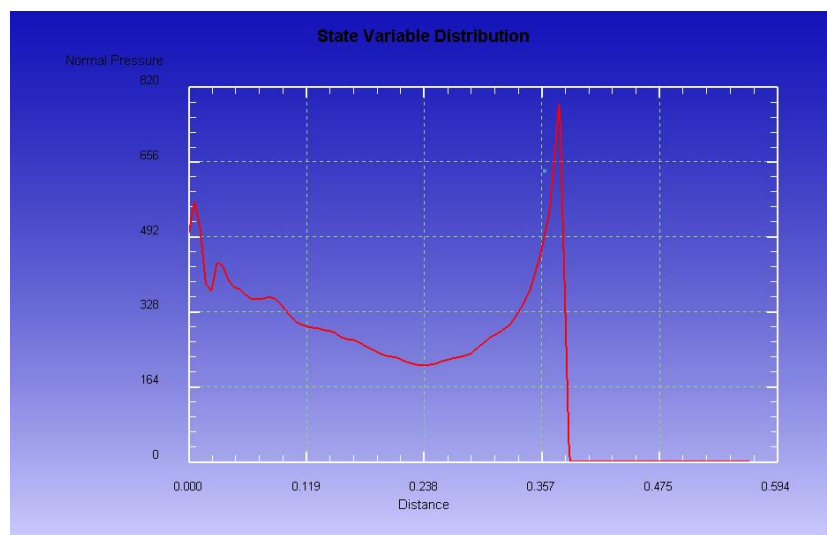


Figura 6.23: Evolución de la presión en función de la distancia al filo para flanco 0.4 mm, primera pasada.

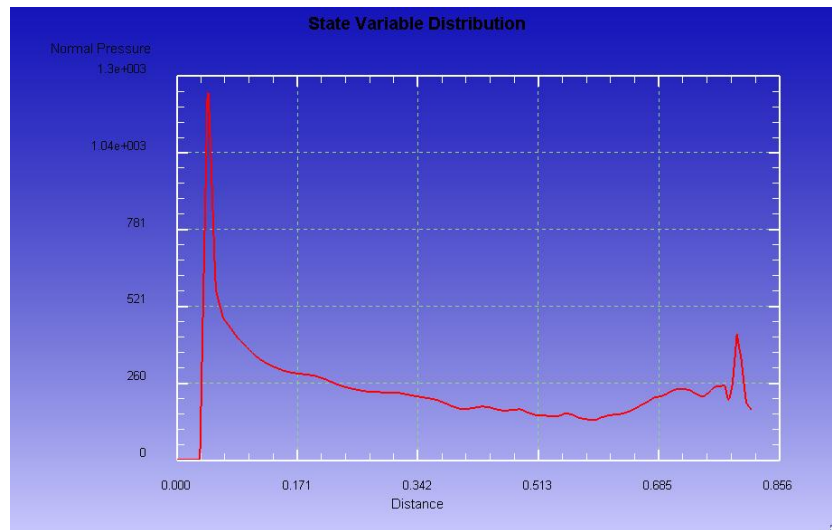


Figura 6.24: Evolución de la presión en función de la distancia al filo para flanco 0.8 mm, primera pasada.

Este hecho, como se explicará más adelante, no se trata de un comportamiento esperado en un mecanizado real y se considera como un fallo del modelo.

6.4. TEMPERATURA.

La temperatura es una de las magnitudes más importantes en mecanizado debido principalmente a la estrecha relación que existe entre ésta y el desgaste generado en la herramienta así como con el daño producido en la superficie mecanizada.

Debido a las características de la simulación numérica, si bien no se obtienen datos leales a los experimentales de manera cuantitativa, sí de manera cualitativa, por lo que se realiza el estudio térmico a modo comparativo entre las distintas geometrías de herramienta analizada.

En general, se puede decir, que las máximas temperaturas alcanzadas por la pieza durante la simulación se dan en las zonas secundaria y terciaria de corte, es decir, en

la superficie de contacto viruta- herramienta y en la zona de la pieza que se encuentra justo debajo del filo de la herramienta.

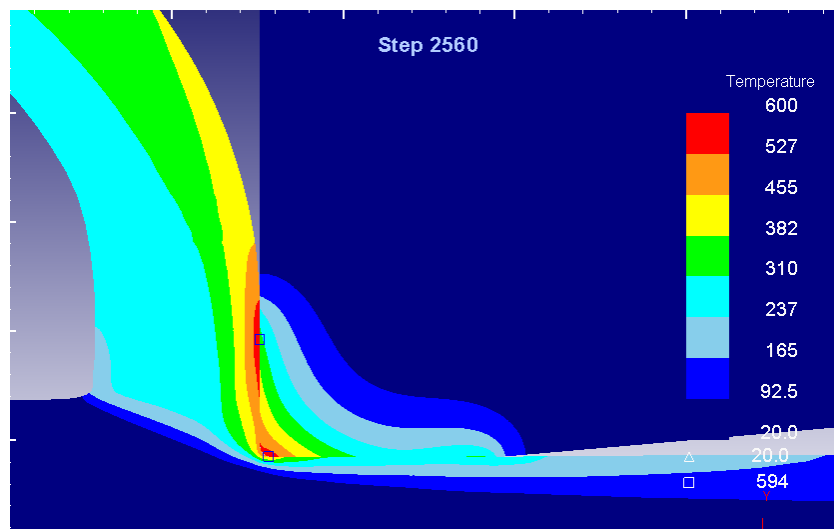


Figura 6.25: Distribución de temperaturas para la herramienta con desgaste de flanco 0.04 mm en la 1 pasada.

Zona de contacto viruta-herramienta:

Se observa una misma distribución de temperaturas en la zona de contacto viruta-herramienta (así como en la viruta en general) para todos los niveles de desgaste, tanto en la primera pasada como en la segunda, si bien los valores máximos no son los mismos.

A continuación se muestra una imagen comparativa de la distribución y valor máximo de la temperatura entre los distintos tipos de desgaste:

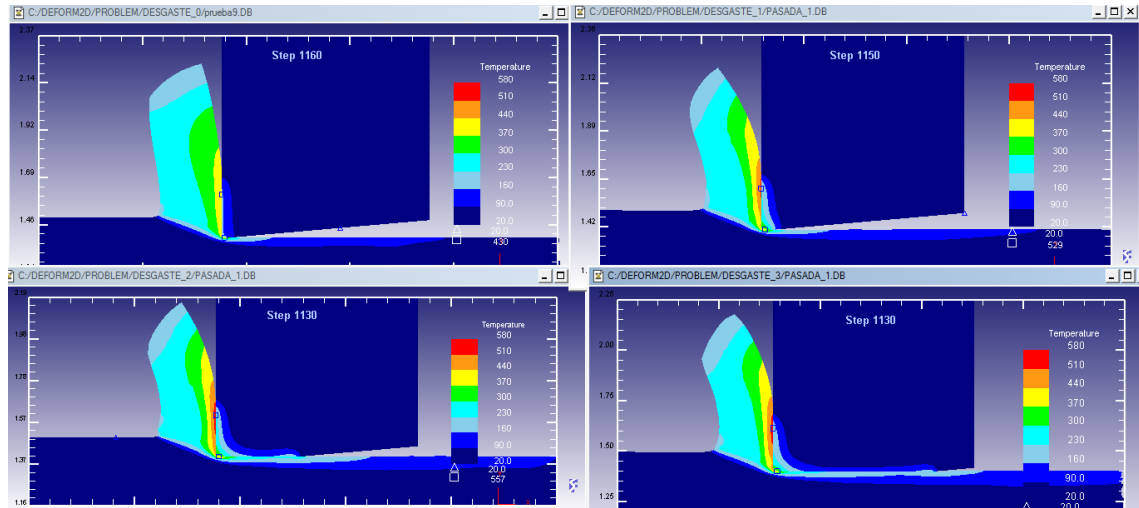


Figura 6.26: Comparación de la distribución de temperaturas obtenidas en la viruta durante la primera pasada para los cuatro niveles de desgaste. (De izquierda a derecha y de arriba abajo: Sin desgaste, desgaste 0.05 mm, desgaste 0.4 mm y desgaste 0.8 mm)

En la siguiente tabla se recogen los valores máximos registrados en sendas pasadas para esta zona:

TEMPERATURA MÁXIMA [°C]	DESGASTE			
PASADA	0	0.05 mm	0.4 mm	0.8 mm
1	441	450	495	501
2	405	409	410	440

Tabla 6.6: Temperaturas máximas alcanzadas en la zona de contacto viruta-herramienta.

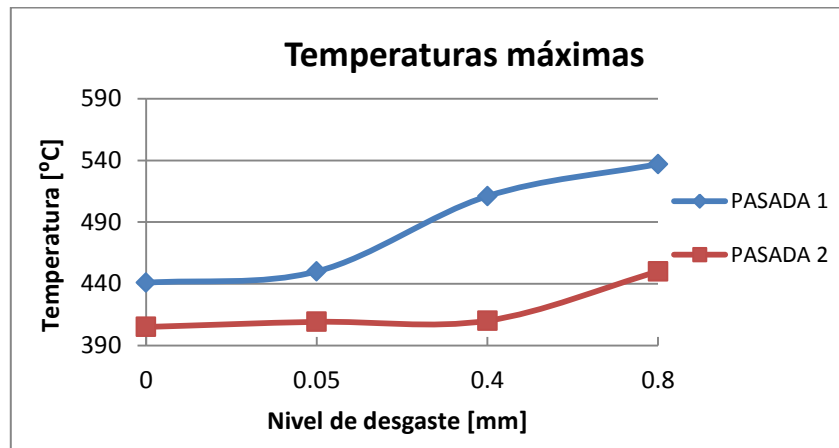


Figura 6.27: Temperatura máxima en función del nivel de desgaste en la zona secundaria de corte.

A raíz de los valores mostrados se puede concluir que:

- Los valores máximos de la temperatura aumentan con el desgaste de flanco en la primera pasada, de manera que dicho valor aumenta un 2% con el desgaste de flanco de 0.05 mm, un 12% un desgaste de 0.4 mm y un 14% con el de 0.8 mm.
- Los valores máximos en la segunda pasada sufren variaciones de magnitud inferiores a los de la primera pasada con el nivel de desgaste. Así estas variaciones son del 1% para los desgastes de 0.05mm y 0.4 mm y de un 8% para el nivel de desgaste de 0.8 mm.
- Los valores máximos disminuyen en la segunda pasada, respecto a la primera para un mismo nivel de desgaste. Esta disminución es cercana al 9% para la herramienta sin desgaste y para el desgaste 0.05mm, un 20% para el desgaste 0.4 mm y 16% para el de 0.8 mm.

Además, en comparación con lo obtenido en la Tesis, los valores registrados para la herramienta con acomodación de filo y para la de flanco 0.8 mm son un 10 y un 16 % inferiores respecto a los de la misma. Esto en parte es coherente teniendo en

cuenta que el material es más resistente y las fuerzas de corte superiores en dicha Tesis.

Zona de contacto superficie mecanizada-herramienta:

Es en esta zona donde más se van a notar las variaciones inducidas por el desgaste de flanco, ya que con la introducción del mismo, se aumenta el área de contacto, y por tanto la fricción.

En este caso se observan variaciones tanto en la distribución de temperaturas como en sus máximas:

- Aumenta la superficie de altas temperaturas.
- Aumenta el valor de la temperatura máxima.
- La existencia de flanco modifica la distribución de temperaturas en el espacio, ya que genera un máximo relativo, allí donde el flanco deja de estar en contacto con la pieza.

La siguiente imagen muestra una comparativa entre los cuatro niveles de desgaste, en el que se pueden apreciar estos efectos:

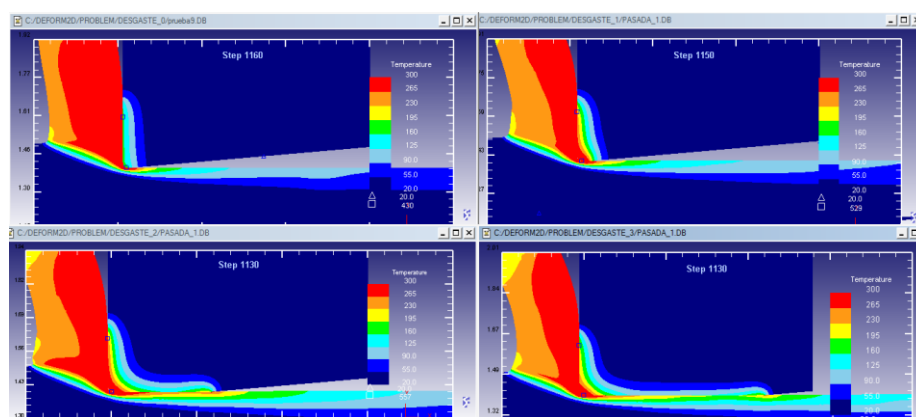


Figura 6.28: Comparación de la distribución de temperaturas obtenidas en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada durante la primera pasada para los cuatro niveles de desgaste. (De izquierda a derecha y de arriba abajo: Sin desgaste, desgaste 0.05 mm, desgaste 0.4 mm y desgaste 0.8 mm)

A continuación se muestran unos gráficos de la evolución de la temperatura en la primera pasada en función de la distancia a la zona de corte, y que ilustran las observaciones anteriores:

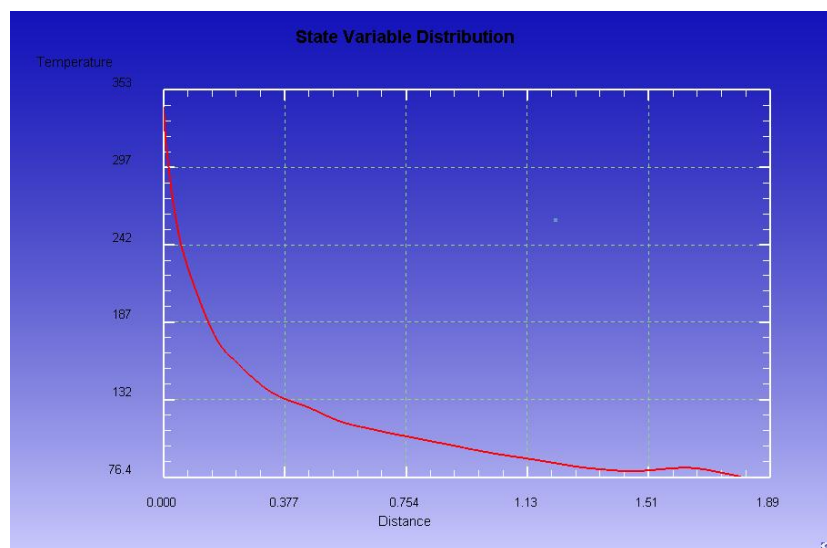


Figura 6.29: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta sin desgaste.

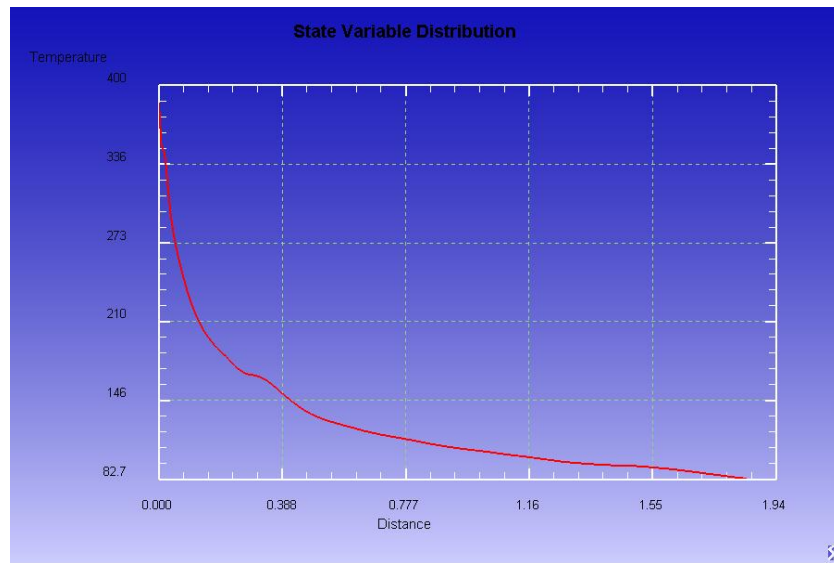


Figura 6.30: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 mm.

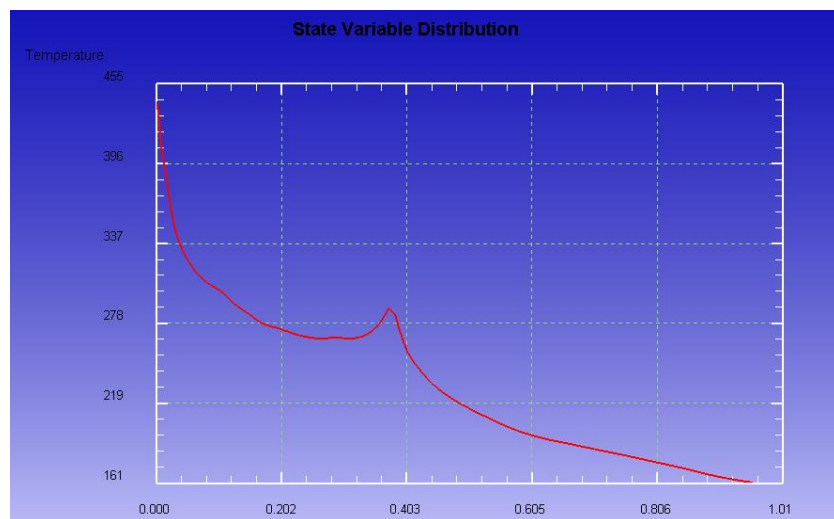


Figura 6.31: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm.

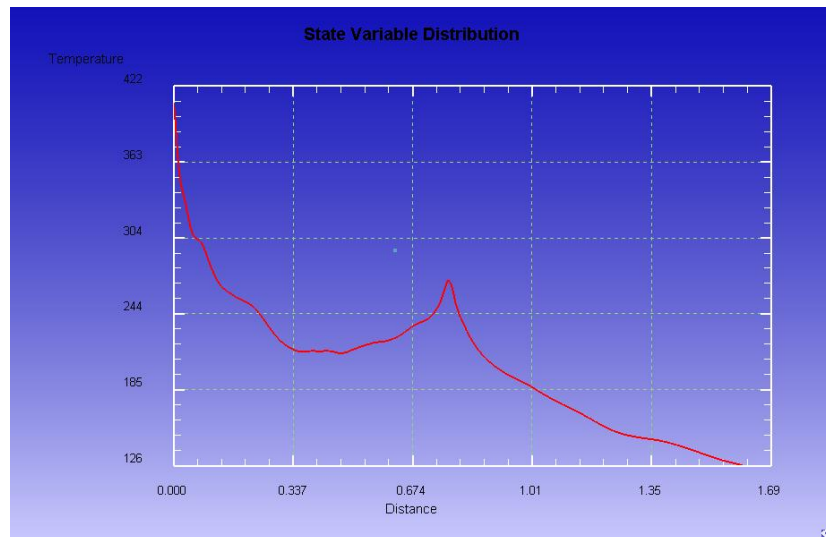


Figura 6.32: Evolución de la temperatura durante la primera pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm.

En la segunda pasada se aprecian las mismas tendencias, con la salvedad de que las máximas disminuyen frente a las obtenidas en la primera pasada.

También se muestra la evolución de la temperatura con la distancia a la zona de corte en las siguientes gráficas:

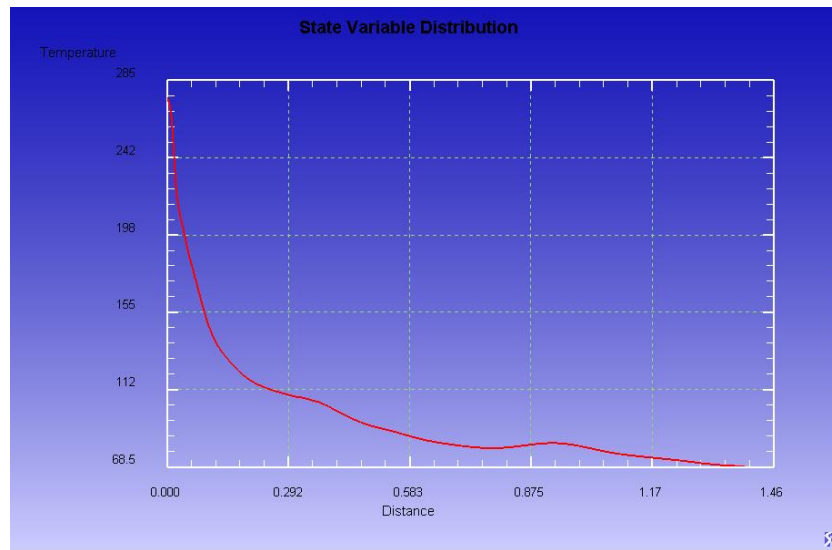


Figura 6.33: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta sin desgaste.

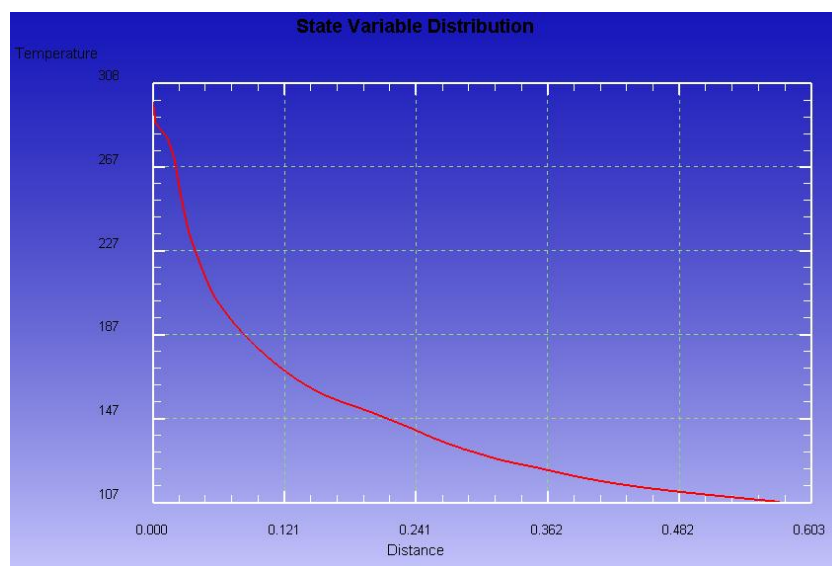


Figura 6.34: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.05 mm.

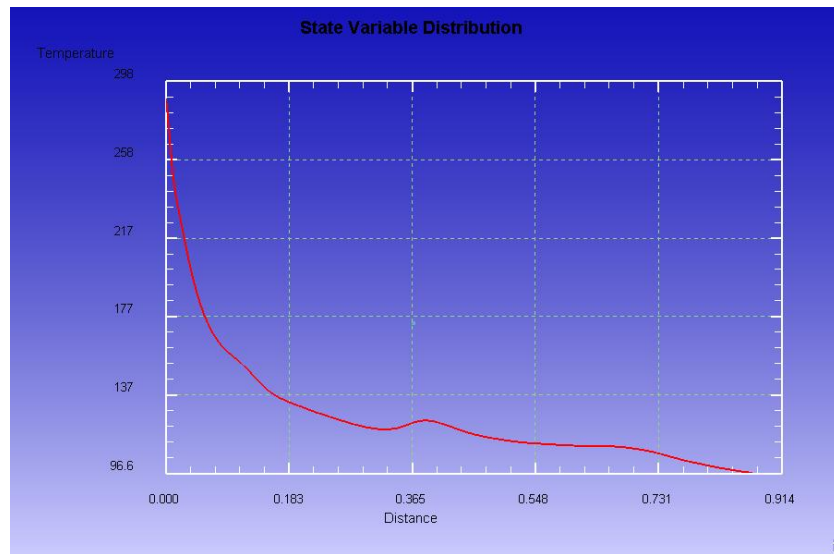


Figura 6.35: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.4 mm.

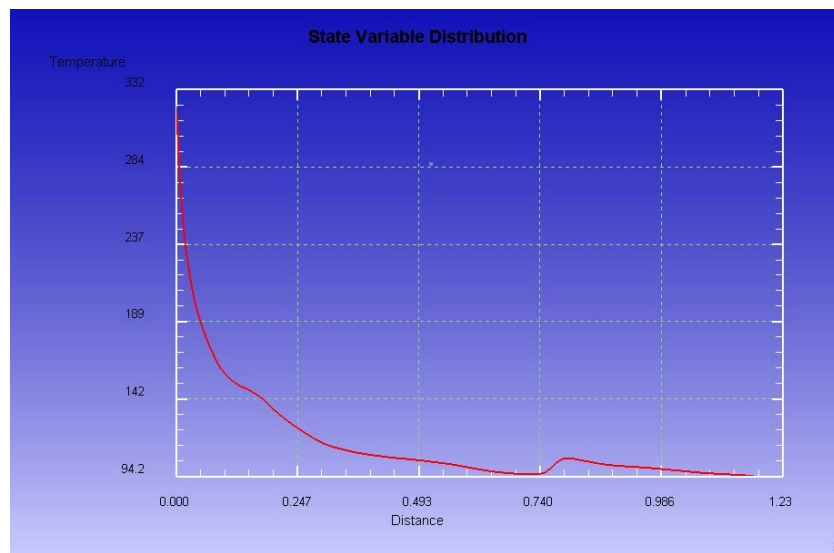


Figura 6.36: Evolución de la temperatura durante la segunda pasada en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada para la herramienta con desgaste de flanco 0.8 mm.



Se puede observar claramente un máximo relativo en el punto en el que el flanco deja de hacer contacto, como se comentaba anteriormente. El mismo hecho se observaba con la presión en el apartado correspondiente.

Este comportamiento no coincide con el comportamiento esperado en un mecanizado real y puede ser debido a problemas del modelo para simular el mecanizado debido a la arista que forma la geometría de la zona al final del flanco. Esta singularidad en los resultados del modelo también se observaba en el modelo desarrollado en la Tesis [\[1\]](#).

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.

En este trabajo se han simulado cuatro niveles de desgaste de flanco en la herramienta (0, 0.05, 0.4 y 0.8 mm), para cada uno de los cuales se han realizado dos pasadas.

A la vista de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, como resultado de todas las simulaciones realizadas, se podría afirmar que:

1. El desgaste de flanco no afecta a las magnitudes de la zona secundaria de corte. Se ha comprobado que las variaciones tanto de los valores de geometría de viruta, como de presión y temperatura en esa zona no variaban apreciablemente. Esto coincide con lo que cabía esperar de antemano.
2. El desgaste sí influye en la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada: aumenta el área de contacto, aumenta la presión máxima en la dicha zona, así como las temperaturas máximas. Esto también coincide con lo que cabía esperar de antemano.
3. En las simulaciones correspondientes a geometría de herramienta con flanco se observa un máximo relativo de la temperatura y de la presión normal en la zona final del flanco (zona de pérdida de contacto herramienta-superficie mecanizada). Este hecho constituye una anomalía con respecto al comportamiento esperado, y ya se observó en los resultados del modelo desarrollado en la Tesis de la profesora Marín [\[1\]](#). Se considera que es debido a problemas para la modelización correcta del mecanizado por efecto de la geometría de la herramienta en dicha zona y que genera

errores en los resultados del modelo relacionados (fuerzas de mecanizado, tensiones residuales, etc.).

A lo largo de este proyecto se ha hecho una aproximación a este análisis realizando una modificación en la geometría de la herramienta: introducción de un radio de acuerdo entre las superficies de flanco e incidencia de la herramienta, pensando que la arista viva podría ser una posible causa del problema. Los radios utilizados fueron: 0.02 mm y 0.1 mm

Los resultados obtenidos no muestran variación apreciable en los picos observados para la temperatura y la presión, pero sí en el comportamiento de las fuerzas. Se observa una disminución del incremento brusco en la fuerza de corte que se daba en el punto en el fin de flanco, así como una más rápida estabilización de la fuerza de avance. Estos resultados son mucho más apreciables utilizando un radio de acuerdo de 0.1. mm que en el caso de radio 0.02 mm..

4. Las fuerzas de mecanizado aumentan con el desgaste de flanco, siendo notablemente mayor el incremento del valor de la fuerza de avance con el desgaste que el de la fuerza de corte.

Este aumento además es mayor en la segunda pasada que en la primera, aunque los valores son, de manera general, inferiores.

5. Se han comparado los valores obtenidos para las fuerzas con los que se alcanzan en la Tesis, tanto en el modelo numérico, como experimentalmente. Se comprueba que, si bien los valores del modelo numérico de la Tesis difieren menos de los experimentales que los de este proyecto, ya que han sido previamente ajustados numéricamente, con la primera y segunda pasada realizadas en este proyecto se alcanza una mejor aproximación a la tendencia que los datos experimentales presentan con el desgaste de flanco, especialmente para la fuerza de avance y la relación F_a/F_c .

6. Por último, también se han comparado los resultados obtenidos para la geometría de viruta, así como los obtenidos para la temperatura máxima en la superficie mecanizada, con los que presenta la Tesis para la herramienta con acomodación de filo y con desgaste 0.8 mm. Se observan unas diferencias generalizadas cercanas al 20%, esperadas debido sobre todo a la modificación del material, pero, lo que se considera más importante, en ambas se observa una misma tendencia en los datos con el aumento del desgaste de flanco.

A la vista de los resultados y las conclusiones anteriores se considera que como línea de trabajo futura y complementaria a este proyecto sería interesante analizar el motivo de los bruscos incrementos observados para la temperatura y la presión en la zona de pérdida de contacto del flanco con la superficie mecanizada, así como las anomalías detectadas en los resultados de las fuerzas de mecanizado. Se considera muy adecuado poder encontrar la causa de esta alteración para poder compensarla o solucionarla en simulaciones posteriores. Ya se ha comprobado que aumentar el radio de acuerdo entre superficies mejora al menos los resultados relativos a las fuerzas de mecanizado, por lo que analizar la influencia del mismo, podría ser un buen punto de partida.

Además, se considera interesante ajustar el modelo experimentalmente, al igual que se hizo en la Tesis [\[1\]](#), lo que nos permitiría mejorar la correlación entre los resultados numéricos y experimentales.

También sería interesante realizar una caracterización experimental adecuada del material empleado en los ensayos de corte ortogonal para emplear en el modelo numérico una ecuación constitutiva más representativa del material. Es razonable que de esta forma la correlación con los resultados experimentales mejoraría significativamente.



Por último, se sugieren realizar simulaciones con otras condiciones de corte (distintas velocidades de corte y avance), así como realizar un estudio similar con otras geometrías de desgaste de herramienta.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Marín Calvo, N: 'Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidable austeníticos'. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [2] 'El Mecanizado Moderno' (Sandvik, 1994, 1ª edición).
- [3] E. Paul DeGarmo, J. Temple Black, Ronald A. Kohser: 'Materiales y procesos de fabricación' (Editorial Reverté S.A., 1988, 2ª Edición).
- [4] Amelia Nápoles Alberro: 'Tecnología mecánica' (Ediciones UPC, 2000, 1ª Edición).
- [5] L.N. López de Lacalle Marcaide, J.A. Sánchez Galíndez, A. Lamikiz Menchaca: 'Mecanizado de alto rendimiento. Procesos de arranque' (Ediciones Técnicas Izaro, 2004, 1ª edición).
- [6] Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro Martínez, Juan Carlos del Real Romero: 'Procesos industriales para materiales metálicos' (Editorial Visión Libros, 2006, 2ª Edición).
- [7] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid: 'Manufactura, ingeniería y tecnología'



(Prentice-Hall, 2002, 4ª Edición).

[8] Heinrich Gerling: 'Alrededor de las máquinas herramienta' (Editorial Reverté S.A., 1992, 3ª Edición).

[9] Metals Handbook®. Ninth edition. Volume 16, 'Machining' (ASM International, 1989).

[10] Francisco García Ochoa: 'Problemas de campos electromagnéticos resueltos por ordenador' (Colección Ingeniería. Universidad Pontificia de Comillas).

[11] Apuntes Tecnología de Fabricación I, Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.

[12] Apuntes Tecnología de Fabricación II, Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.

[13] Apuntes de Mecánica de Sólidos. Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.

[14] Apuntes de Cálculo de Máquinas, Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.

[15] www.torosite.com.

[16] <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv.php?pid=tesisuned:IngInd-r Alvarez&dsID=pdf>

